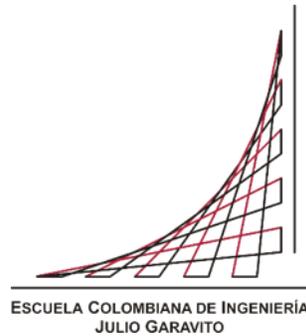


ANÁLISIS DE LA COMBINACIÓN DE METODOLOGÍAS BASADAS EN REGLAS DE PRIORIDAD (PR) PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN DE MÚLTIPLES PROYECTOS CON RECURSOS RESTRINGIDOS (RCMPSP)



ESTUDIANTES:

Ing. Nancy Johana Amaya Rodríguez
Ing. María Angélica Ayala Betancourt
Ing. Rafael Alexánder Doncel Velasco
Ing. Oscar Javier Sarmiento Álvarez

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
UNIDAD DE PROYECTOS
MAESTRÍA EN DESARROLLO Y GERENCIA INTEGRAL DE PROYECTOS
BOGOTÁ
2018

ANÁLISIS DE LA COMBINACIÓN DE METODOLOGÍAS BASADAS EN REGLAS DE PRIORIDAD (PR) PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN DE MÚLTIPLES PROYECTOS CON RECURSOS RESTRINGIDOS (RCMPSP)



ESTUDIANTES:

Ing. Nancy Johana Amaya Rodríguez
Ing. María Angélica Ayala Betancourt
Ing. Rafael Alexander Doncel Velasco
Ing. Oscar Javier Sarmiento Álvarez

TRABAJO DE GRADO DIRECTOR:

Ing. Germán Eduardo Giraldo González

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
UNIDAD DE PROYECTOS
MAESTRÍA EN DESARROLLO Y GERENCIA INTEGRAL DE PROYECTOS
BOGOTÁ
2018

Nota de aceptación:

El Trabajo de Grado “Análisis de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP)” presentado por los estudiantes Nancy Johana Amaya Rodríguez, María Angélica Ayala Betancourt, Rafael Alexander Doncel Velasco y Óscar Javier Sarmiento Álvarez, para optar por el título de Magíster en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, cumple con los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Firma del director del trabajo de grado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. 17. 07. 2018

DEDICATORIA

“A mi amado Dios quien me permitió cumplir el sueño de realizar mis estudios de Maestría en la gran Escuela Colombiana de Ingeniería, a mi papito por enseñarme que la educación es el camino para alcanzar los sueños, a Charlee mi amado hermanito quien además de inspirarme a alcanzar grandes retos ha hecho posible que muchos sean realidad, a Johnsito mi amado hermanito menor por ser ejemplo para sus hermanos terminando primero que ellos sus estudios de postgrado, a mi familia y amigos por impulsarme y ser pacientes en mis reiteradas ausencias, y a Rafa, Angie y Oscar por ser los inigualables compañeros de equipo a quienes recibo de Dios también como una bendición en mi camino”

Nancy J Amaya R

“A Dios por su perfección, por ser quien me acompaña en cada paso del camino y quien hace posible cumplir uno a uno mis sueños, a mi angelito lindo Valentina por mostrarme en medio de este proceso el valor de la fortaleza, amor, y pureza, porque ahora eres tu mi brújula y motor de inspiración, a mis amados padres porque sin importar donde se encuentren siempre han creído en mi y han disfrutado mis logros como los suyos propios, a mi equipo de trabajo Nancy, Rafa y Oscar por hacer este camino el mas enriquecedor y divertido de todos, por nuestras largas noches de trabajo, risas y gozo, por escogerme como su manager y compañera de trabajo, por darme la oportunidad de entrar en sus vidas, y por hacer de este nuestro primer Proyecto el mejor de todos los que empezaremos juntos”

María Angélica Ayala B

“Le quiero dedicar estas palabras a Dios, porque de su mano he conseguido cumplir mis objetivos y salir adelante en cada una de las metas propuestas, a mi esposa Andrea por su lección de amor y paciencia, a mi mamá por su lección de humildad y apoyo, a mi abuela por su lección de tenacidad, a mi abuelo (Q.E.P.D) por inculcarme el amor al estudio y su lección de honestidad, a mi hija Sara por ser mi compañera incondicional en mis tareas y su lección vida y ternura, a Nancy, María Angélica y Óscar por su lección de incondicionalidad y amistad sincera, quienes son ya parte de la parroquia del “Patojo”

Rafael A. Doncel Velasco

“Dedico este trabajo de grado: a Dios quién permitió la realización de este estudio con mi crecimiento profesional y personal, a mi Ross por el amor, comprensión y apoyo incondicional en mi vida para el logro de mis objetivos, a Maty y Lucy quienes son la fuerza para seguir adelante, a Bety y Chato por el amor, el acompañamiento y formación durante toda mi vida, a María Angélica, Nancy J y Rafa por permitirme hacer parte de este equipo de trabajo y aprendizajes en mi vida” .

Óscar Javier Sarmiento A

AGRADECIMIENTOS

Los estudiantes del presente trabajo de grado agradecen a todas las personas e instituciones que apoyaron el desarrollo del mismo en todas sus etapas. A nuestras familias por su apoyo incondicional, comprensión y paciencia para que pudiésemos dedicar todo el tiempo que fue necesario. A nuestro querido Director Ing. Germán Giraldo por su dedicación, entrega, compromiso, rigor y experiencia en el campo de la investigación que enriqueció este proceso.

Al asesor estadístico Est. Iván Mendedelso por su disposición, dedicación y compromiso en el desarrollo de uno de los componentes más importantes de este Trabajo de Grado. A Juanita del Mar Mora integrante del semillero de investigación “Gerencia de proyectos” de la Escuela por su diligente y oportuno aporte al desarrollo de esta investigación.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería por ofrecer un programa de tan alta calidad y con acreditación institucional, al cual nos sentimos muy orgullosos de haber pertenecido y que será determinante en nuestra vida y experiencia profesional.

A la Unidad de proyectos por ser la base del desarrollo de este programa y por su grupo de docentes que enriquecen integralmente nuestra formación académica y personal.

A Daniel Salazar y Maria Patricia Zuluaga por su apoyo más allá del aula de clase y su capacidad de inspirarnos para ser mejores cada día.

A las instituciones y compañías donde trabajamos por la posibilidad de cursar nuestros estudios teniendo flexibilidad de tiempo, además a nuestros jefes inmediatos y compañeros de trabajo por su comprensión y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	27
1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE GRADO.....	29
2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	30
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
3. JUSTIFICACIÓN	31
3.1. IMPORTANCIA Y RELEVANCIA DEL TRABAJO DE GRADO	32
3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA.....	34
3.3. ÁRBOL DEL PROBLEMA.....	35
4. MARCO TEÓRICO	36
4.1. El problema RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem).	36
4.2. El problema RCMPSP (Resource Constrained Multi-project Scheduling Problem).....	37
4.2.1. Antecedentes del problema RCMPSP.....	40
4.2.2. Métodos de solución.....	42
4.2.2.1. Métodos Exactos.....	42
4.2.2.2. Métodos heurísticos.	46
4.2.2.3. Otras herramientas y métodos	51
4.3. Descripción de los principales hallazgos de diferentes autores que resuelven el problema RCMPSP.....	52
4.4. Hallazgos sobre combinaciones de reglas de prioridad (PR)	54
5. METODOLOGÍA.....	60

5.1	Pregunta de Investigación	60
5.1.1	Tipo de investigación.....	60
5.1.2	Etapas de la Investigación.....	60
5.1.2.1	Inicio	63
5.1.2.2	Planeación.....	63
5.1.2.3	Ejecución.....	66
a.	Selección de métodos	66
b.	Selección de medidas de desempeño	71
c.	Instancias	73
d.	Combinaciones de dos (2) y tres (3) reglas de prioridad (PR).....	76
e.	Análisis de resultados de las combinaciones	87
f.	Identificación y caracterización de instancias de mayor complejidad	90
g.	Identificación y caracterización una instancia de un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia.	93
6.	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	94
6.1.	Descripción de resultados obtenidos.....	94
6.1.1.	Salida (Output) del Software.....	94
6.1.2.	Tabulación.....	96
6.2.	Análisis de medias (ANOM).....	103
6.2.1.	Tiempo computacional	103
6.2.2.	Program Makespan	103
6.2.3.	Program mean flow time.....	104
6.2.4.	Program maximum lateness y Program Maximum tardiness.....	105
6.2.5.	Program Mean Lateness	106

6.2.6.	Program Total tardiness	106
6.2.7.	Program Mean tardiness	107
6.2.8.	Program Number of Tardy Projects	108
6.2.9.	Program Number of tardy jobs.....	108
6.3.	Diagrama de Pareto	109
6.4.	Ranking global.....	110
6.5.	Resultados de las repeticiones de las mejores reglas o combinaciones	113
6.6.	Análisis estadístico para las mejores reglas o combinaciones	116
6.7.	Regresión lineal.....	147
6.8.	Identificación y caracterización instancia de mayor complejidad	151
6.7	Caracterización de un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia	163
7.	CONCLUSIONES.....	172
8.	RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	174
9.	PLAN DE GERENCIA	175
9.1.	INTRODUCCIÓN.....	175
9.2.	INICIACIÓN	175
9.2.1.	PROJECT CHARTER.	175
9.2.2.	Registro de Stakeholders	177
9.2.3.	Identificación de Stakeholders.....	177
9.2.4.	Clasificación y evaluación de los Stakeholders	179
9.2.5.	Estrategias de manejo de Stakeholders	182
9.2.6.	Plan de gestión de Stakeholders	185
9.3.	PLANEACIÓN	189

9.3.1.	Documentación de requerimientos y matriz de trazabilidad	189
9.3.2.	Declaración de alcance.	197
9.3.3.	WBS: estructura de Desglose del Trabajo de Grado.....	200
	Diccionario de la WBS.....	201
9.3.4.	Línea base de tiempo (Cronograma).....	207
9.3.5.	Línea base de costos (Presupuesto)	209
9.3.6.	Plan de calidad: definir objetivos (métricas) de calidad, aseguramiento y control 214	
9.3.7.	Organigrama.....	216
9.3.8.	Matriz de asignación de responsabilidades.....	216
9.3.9.	Matriz de comunicaciones	222
9.3.10.	Registro de riesgos (Identificación y respuesta)	225
9.4.	SEGUIMIENTO Y CONTROL.....	232
9.4.1.	Formato informes de desempeño.....	232
9.4.2.	Formato solicitudes de cambio	236
9.4.3.	Formato control y calidad	238
9.4.4.	Formato de actas de reunión.....	239
10.	CIERRE	241
10.1.	Formato aceptación.....	241
9.4.5.	Formato lecciones aprendidas.....	242
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	243
	ANEXOS	253

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Artículos seleccionados.....	65
Tabla 2. Reglas de prioridad seleccionadas.....	68
Tabla 3. Medidas de desempeño seleccionadas	72
Tabla 4. Características de las instancias	75
Tabla 5. Total combinaciones dobles para la instancia 34	82
Tabla 6. Total combinaciones triples para la regla de prioridad EDD de la instancia 3485	
Tabla 7. Resumen del total de combinaciones.....	87
Tabla 8. Métricas de proyecto - Combinación EDD FCFS para la instancia 3	94
Tabla 9. Métricas de proyecto – Combinación EDD FCFS LALP para la instancia 3....	95
Tabla 10. Orden de ejecución - Computing total time in Seconds Combinación EDD FCFS para la instancia 3	95
Tabla 11. Orden de ejecución - Computing total time in Seconds Combinación EDD FCFS LALP para la instancia 3	95
Tabla 12. Porcentaje uso de recursos - Combinación EDD FCFS para la instancia 3..	96
Tabla 13. Porcentaje uso de recursos - Combinación EDD FCFS LALP para la instancia 3	96
Tabla 14. PR-DESCRIPTIVA EDD FCFS	97
Tabla 15. Estadística descriptiva para la Combinación EDD FCFS	98
Tabla 16. PR-DESCRIPTIVA EDD FCFS LALP.....	99
Tabla 17. Estadística descriptiva para la Combinación EDD FCFS LALP	100
Tabla 18. Mejores reglas de prioridad para cada medida de desempeño.....	109
Tabla 19. Ranking global.....	112
Tabla 20. Resultados de repeticiones para la combinación MS MCS FCFS.....	114
Tabla 21. Resumen de prueba de hipótesis.....	117
Tabla 22. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 3	118
Tabla 23. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 12	120
Tabla 24. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 24	122
Tabla 25. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 34	124
Tabla 26. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 38	126

Tabla 27. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 45	128
Tabla 28. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 49	130
Tabla 29. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 53	132
Tabla 30. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 57	134
Tabla 31. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 59	136
Tabla 32. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 99	138
Tabla 33. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 108	140
Tabla 34. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 113	142
Tabla 35. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 128	144
Tabla 36. Mejores reglas de prioridad por instancia.....	145
Tabla 37. Resultados Regresión Program Makespan Vs AUF.....	148
Tabla 38. Resultados Regresión Program Makespan Vs Complejidad	149
Tabla 39. Parámetros de la instancia	152
Tabla 40. Caracterización de los Proyectos	152
Tabla 41. Tipo de Recursos	153
Tabla 42. Información general del proyecto	156
Tabla 43. Descripción de los recursos cantidad disponible	156
Tabla 44. Relaciones de precedencia	157
Tabla 45. Duración y recursos globales	160
Tabla 46. Caracterización del proyecto No. 1 del caso de estudio “Portal del Parque”	165
Tabla 47. Descripción de Stakeholders identificados	178
Tabla 48. Análisis de Stakeholders Poder + Interés.....	180
Tabla 49. Escala de prioridad de calificación de Stakeholders	181
Tabla 50. Registro de Stakeholders	182
Tabla 51. Diagrama Plan de Gestión de los Stakeholders	186
Tabla 52. Plan de Gestión de los Stakeholders	187
Tabla 53. Requerimientos del Negocio	189
Tabla 54. Requerimientos del Proyecto y Gerencia	190
Tabla 55. Requerimientos del producto (Funcionales).....	191
Tabla 56. Requerimientos del producto (No Funcionales).	191

Tabla 57. Matriz de Trazabilidad	192
Tabla 58. Diccionario de la WBS del Trabajo de Grado	201
Tabla 59. Presupuesto Acumulado del Trabajo de Grado.....	209
Tabla 60. Costos de recursos para la realización del Trabajo de Grado.....	212
Tabla 61 Métricas de Calidad.....	215
Tabla 62 Convenciones Matriz RACI	217
Tabla 63. Matriz RACI	218
Tabla 64. Matriz de comunicaciones	222
Tabla 65. Escala de Impacto para la clasificación de riesgos	225
Tabla 66. Registro y Análisis de Riesgos	226

LISTA DE ILUSTACIONES

Ilustración 1. Árbol de problema.....	35
Ilustración 2. Enfoque de proyecto simple.....	38
Ilustración 3. Enfoque multi-proyectos	38
Ilustración 4. Enfoque multi-proyectos	39
Ilustración 5. Línea de tiempo con las etapas e hitos más importantes en el estudio de problemas RCPSP y RCMPSP	40
Ilustración 6. Problema RCPSP	41
Ilustración 7. Esquema de la expansión de las ramas en el algoritmo de Branch and Bound.....	46
Ilustración 8. Reducción de costos mediante el uso de metaheurísticas.	49
Ilustración 9. Descripción conceptual del enfoque centralizado para el RCMPSP (C-RCMPSP).....	54
Ilustración 10. Diagrama de proceso etapas de la investigación.....	61
Ilustración 11. Ejemplo de combinación de dos reglas de prioridad (EDD FCFS) para la instancia 34	77
Ilustración 12. Ejemplo de combinación de tres reglas de prioridad (EDD FCF WAP) para la instancia 34	77
Ilustración 13. Representación de como se seleccionaron las mejores reglas de prioridad	111
Ilustración 14. Especificaciones computador utilizado para correr las instancias	113
Ilustración 13. Caracterización DSMs Proyecto 1	154
Ilustración 14. Caracterización Proyecto 2	154
Ilustración 15 Caracterización del Proyecto 3	155
Ilustración 16. Clasificación de Stakeholders	181
Ilustración 17. WBS del Trabajo de Grado	200
Ilustración 18. Cronograma del Trabajo de Grado	208
Ilustración 19. Línea base de Costo	211
Ilustración 21 Organigrama del Trabajo de Grado	216

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Ranking de resultados para Program Makespan.....	103
Gráfica 2. Ranking de resultados para Program mean flow time	104
Gráfica 3. Ranking de resultados para Program maximum lateness	105
Gráfica 4. Ranking de resultados para Program Mean lateness	106
Gráfica 5. Ranking de resultados para Program Total tardiness.....	106
Gráfica 6. Ranking de resultados para Program maximum tardeiness	105
Gráfica 7. Ranking de resultados para Program Mean tardiness.....	107
Gráfica 8. Ranking de resultados para Program Number of Tardy Projects.....	108
Gráfica 9. Ranking de resultados para Program Number of tardy jobs	108
Gráfica 10. Pareto de las mejores Reglas de Prioridad.....	110
Gráfica 11. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 3	116
Gráfica 12. Histograma de distribución de datos Instancia 3	117
Gráfica 14. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 12	119
Gráfica 15. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 24	121
Gráfica 16. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 34	123
Gráfica 17. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 38	125
Gráfica 18. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 45	127
Gráfica 19. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 49	129
Gráfica 20. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 53	131
Gráfica 21. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 57	133
Gráfica 22. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 59	135
Gráfica 23. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 99	137
Gráfica 24. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 108	139
Gráfica 25. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 113	141
Gráfica 26. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 128	143
Gráfica 27. Frecuencia de las mejores reglas de prioridad en las instancias.....	146
Gráfica 27. Relación entre Program Makespan y AUF.....	148

Gráfica 28. Relación entre Program Makespan y Complejidad.....	149
Gráfica 29. Relación entre AUF Vs Program Mean Latenes	151

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Combinaciones posibles tanto de 2 como de 3 reglas de prioridad.....	254
Anexo B - Tabulación y análisis estadístico descriptivo para las combinaciones dobles y triples.....	255
Anexo C - Consolidación de los resultados obtenidos para las medidas de desempeño de las reglas de prioridad y sus combinaciones dobles y triples.....	256
Anexo D - Ranking Global.....	257
Anexo E - Resultados de repeticiones para las 7 mejores combinaciones	258
Anexo F - Instancia de alta complejidad.....	259
Anexo G - Caracterización como instancia del multi-proyecto “Portal del Parque”	260

GLOSARIO

CCPM: *Critical chain project management* (CCPM) es un método de planificación y gestión de proyectos que pone el mayor énfasis en los recursos necesarios para ejecutar las tareas del proyecto. Cadena Crítica de Gestión de Proyectos se basa en métodos y algoritmos derivados de la Teoría de las Restricciones.

DIAGRAMA DE GANTT: es una herramienta gráfica cuyo objetivo es exponer el tiempo de dedicación previsto para diferentes tareas o actividades a lo largo de un tiempo total determinado.

DIAGRAMA DE PERT: es una representación gráfica de las relaciones entre las tareas del proyecto que permite calcular los tiempos del proyecto.

HEURÍSTICO: es el conjunto de métodos y técnicas que se emplean con el fin de encontrar y solucionar un problema en aquellos casos que es difícil hallar una solución óptima o satisfactoria.

INSTANCIA: es un ejemplo específico de un problema a tratar. Ejemplo que contiene una clase general de problemas de secuenciación y programación de tareas.

MATRIZ DE ESTRUCTURA DE DISEÑO (DSM): es una representación compacta de la estructura de un sistema, la cual es susceptible a análisis visual e interactivo, pero también a la aplicación de algoritmos provenientes en su mayoría de la teoría de grafos.

MEDIDA DE DESEMPEÑO: variable que permite medir el desempeño de una posible solución al problema planteado.

PORTAFOLIO: es una colección de proyectos y/o programas que en conjunto facilitan la administración efectiva del trabajo para lograr los objetivos estratégicos.

PRECEDENCIA: consiste en la relación entre actividades y que obliga a que cada actividad no puede ser iniciada antes de que todas sus actividades predecesoras hayan terminado.

PREEMPTION: una vez la actividad inicia, su progreso no es interrumpido.

PREEMPTIVE PROJECT SCHEDULING: aquellos proyectos en los que el completamiento de una actividad puede interrumpirse temporalmente y reiniciarse más adelante.

PROGRAMA: es un grupo de proyectos relacionados y administrados en forma coordinada para obtener beneficios y control no disponible si se administran en forma individual.

PROGRAMACIÓN: la programación consiste en la secuenciación de actividades en el tiempo para la ejecución de un proyecto. La programación muestra la secuencia de pasos a seguir para lograr la terminación del proyecto, llevarse a un caso más general, donde, no solo se asigne en el tiempo la ejecución de una actividad, sino, que se puede asignar el uso de recursos como personas, insumos, o dinero lo cual puede llegar a retrasar la duración del proyecto.

RECURSO RENOVABLE: cuando su disponibilidad es constante para cada unidad de tiempo, por lo que su utilización o no, no afecta la disponibilidad del recurso en unidades de tiempo posteriores.

RECURSO NO RENOVABLE: cuando la disponibilidad en el horizonte de planeación del proyecto es limitada, pero no está restringida en cada periodo, por lo que la disponibilidad de recurso depende de su utilización en unidades de tiempo anteriores.

REGLA DE PRIORIDAD: criterio que permite decidir qué actividades realizar primero manteniendo el orden lógico de la red de programación.

RUTA CRÍTICA: el método de la ruta crítica es una metodología de la gestión de proyectos que nos permite entre otros aspectos estimar la duración de un Proyecto. Para este propósito es necesario conocer las actividades que contempla el proyecto, su duración en una unidad de tiempo y el orden en el cuál deben ser realizadas (por ejemplo, algunas actividades se pueden desarrollar sólo cuando una o varias actividades previas o predecesoras han sido completadas).

TRANSFER TIME: Tiempo de transferencia. Es el tiempo estimado para la finalización de una transmisión de datos

ABREVIATURAS

ANOM: *Analysis of means*. Análisis de medias.

ANOVA: *Analysis of variance*. Análisis de Varianza.

APD: *Average Project Delay*, Retraso medio del proyecto. Se define como la desviación relativa media de la ruta crítica de un proyecto simple sobre la ruta crítica del multi-proyectos.

ARLF: *Average Resource Loading Factor*. Factor de carga de recursos promedio.

AUF: *Average Utilization Factor*, Factor de utilización media de los recursos.

C: *Measure of network complexity*, Medida de la complejidad de la red.

CP: *Critical Path Time*, Tiempo de ruta crítica. Hace referencia al tiempo de finalización de cada actividad programada por el método de la ruta crítica

CPM: *Critical Path Method*, Método de ruta crítica.

DRCMPSP: *Decentral Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem*. Problema de la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos y distribuidos.

DRCMPSP-RT: *Decentralized Resource Constrained Multi-Project Scheduling with Resource Transfer Time*, Problema de la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos y distribuidos con transferencia de recursos.

DSM: *Design Structure Matrix*.

EDD: *Earliest Due Date*. Fecha de entrega más temprana.

FCFS: *First Come First Served*. Primera en llegar primera en terminarse.

FTP: *File Transfer Protocol*.

LALP: *Longest activity from longest Project*. Actividad más larga del proyecto más largo.

LCFS: *Last come first served*. Última en llegar primera en servirse.

LCR: *Least criticality ratio.* Recurso menos crítico.

LRP: *Least resource proportion.* Proporción de recursos mínima

MAUF: *Modified Average Utilization Factor,* Factor de utilización promedio de recursos modificado.

MAXSLK: *Maximum Slack.* Holgura Máxima

MAXTWK: *Maximum total Work content.* Máximo contenido de trabajo total

MCS: *Maximum critical sucesors.* Máximo total de sucesores críticos

MINLFT: *Minimum late finish time.* Mínimo final tardío

MINSLK: *Minimum Slack.* Holgura minima

MINTWK: *Minimum total Work content.* Mínimo contenido de trabajo total

MOF: *Maximum operation first.* Actividad con la duración más larga primero

MPE: *Multi-Project Environment,* Consiste en un conjunto de proyectos que no están necesariamente relacionados con funciones, pero comparten los mismos recursos de un conjunto de recursos común. El conjunto de proyectos se gestiona de forma estructurada y los proyectos se deben entregar de acuerdo con los objetivos de la organización.

MPM: *Multi-project Management,* Gestión táctica a corto plazo de un conjunto de proyectos en ejecución que comparten los mismos recursos.

MPSPLib: *Multi-project Scheduling Problem Library.* Biblioteca de problemas de programación multi-proyectos (<http://www.mpslib.com>).

MRCMPSP: *Multimode Resource-Constrained Multiple Project Scheduling Problem,* Problema de la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos con múltiples modos.

MRCPSP: *Multi Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem,* Problema de la programación de proyectos con recursos restringidos con múltiples modos.

MS: *Maximum total Sucesora.* Máximo total de sucesoras

NARLF: *Normalized Average Resource Loading Factor,* carga de recurso media normalizada.

PR: *Priority Rule*, Regla de prioridad.

RAN: *Random*. Aleatorio.

RCMPSP: *Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem*, Problema de la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos.

RCMPSPPTT: *Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem with Transfer Times*, Problema de la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos y tiempos de transferencia.

RCMPSP TTC: *Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem with Transfer Times and Cost*, Problema de la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos y tiempos de transferencia y costo.

RCPSP: *Resource-Constrained Project Scheduling Problem*, Problema de la programación de proyectos con recursos restringidos.

RCPSP-RMT: Problema de la Programación de Proyectos con Recursos Restringidos con Tiempos de Movimientos de los Recursos.

RSL: Revisión Sistemática de Literatura.

SASP: *Shortest activity from shortest Project*. Actividad más corta del proyecto más corto.

SFM: *Shortest feasible mode*. Modo más corto posible.

SOF: *Shortest operation first*. Actividad con la duración más corta primero.

SPT: *Shortest processing time*. Tiempo de procesamiento más corto.

Tc: Tiempo Computacional.

TMS: *Minimum Total Makespan*, Tiempo de duración total mínimo.

TWK-EST: *MAXTWK & Earliest early Start Time*. Contenido de trabajo total y tiempo de inicio temprano.

TWK-LST: *MAXTWK & Earliest Late Start Time*. Contenido de trabajo total y tiempo de inicio tardío.

VBA: *Visual Basic for Applications*.

WAP: *Weight Activity Priority*. Prioridad dada por el usuario 1: prioridad por importancia de actividad.

WPP: *Weight Project Priority*. Prioridad dada por el usuario 2: prioridad por importancia de proyecto.

RESUMEN EJECUTIVO

Cada año aumentan los proyectos que sobrepasan el presupuesto o se extienden después de los tiempos de finalización previstos (Flyvbjerg, Bruzelius and Rothengatter, 2003). Para finalizar un proyecto a tiempo y dentro del presupuesto, es indispensable comprender los factores que influyen en el éxito del mismo. Pinto & Prescott (1990) consideran que el cronograma es uno de los diez factores de éxito más importantes de la gerencia del proyecto. De igual manera, indican que los factores críticos de éxito del proyecto a menudo se correlacionan con la calidad durante el proceso de planeación del proyecto.

La mayoría de las organizaciones modernas desarrollan sus actividades en un ambiente multi-proyecto, en las cuales los recursos son escasos y deben ser compartidos por proyectos que se desarrollan simultáneamente. Esto genera una situación de competencia por adquirir rápidamente los recursos necesarios, creando escenarios ineficientes por posibles sobreasignaciones y falta de priorización, al no contar con una metodología para establecer cuál proyecto debe obtener primero los recursos, de acuerdo con los objetivos estratégicos del programa o portafolio de la compañía.

Los entornos con problemas de múltiples proyectos definen la naturaleza de los negocios en la mayoría de las compañías. Lova & Tormos (2001) afirman que el 84% de las empresas trabajan con proyectos múltiples y simultáneos, y Payne (1995) advierte que el 90%, por valor, de todos los proyectos ocurre en el contexto de proyectos múltiples.

La programación en los proyectos consiste en organizar las actividades y asignar recursos en una secuencia óptima que cumpla con los criterios, metas y objetivos organizacionales. Este conjunto de actividades normalmente tiene restricciones de precedencias, sin embargo, en la práctica se evidencian otras restricciones asociadas a los recursos para su completa realización. Cuando los proyectos se desarrollan en un ambiente multi-proyecto, se generan conflictos por su asignación, este tipo de problema se define en la literatura científica como programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP) (Morillo, Moreno y Díaz, 2014).

El problema RCMPSP ha intentado resolverse a través de métodos exactos, los cuales son tipo NP-*Hard*, lo que significa que no hay algoritmos conocidos para encontrar soluciones óptimas en el tiempo polinomial (Kim et al., 2005). Por lo tanto, se hace imperativa la proposición de nuevos métodos de solución, con mayor capacidad, más veloces y con generación de respuestas de buena calidad, razón por la cual los métodos heurísticos y metaheurísticos otorgan una buena alternativa de solución a este tipo de problema (Krüger & Scholl, 2009).

Debido a esto, el trabajo de grado “Análisis de la combinación de metodologías basadas en reglas de prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP)” tiene como objetivo el desarrollo de un método heurístico a partir de la combinación de dos (2) y tres (3) de reglas de prioridad (PR), aplicadas a instancias identificadas en la literatura científica, mediante la evaluación de medidas de desempeño, con el fin de presentar un ordenamiento de las mejores.

Estas combinaciones se realizaron a partir de 19 reglas de prioridad, 14 instancias y 10 medidas de desempeño, utilizando el *software* desarrollado en la investigación adelantada por Aristizábal, Castellanos y Ordóñez, (2017), por el cual se obtuvieron los resultados de todas las posibles combinaciones.

A partir de los resultados arrojados por el *software* para cada una de las medidas de desempeño de las 86.184 combinaciones dobles y triples, se realizó un Análisis de Medias y un *ranking* global del cual se obtuvieron las mejores combinaciones o reglas, para las cuales se realizó un análisis estadístico con el fin de evaluar la aleatoriedad de los datos obtenidos.

Teniendo en cuenta que se propusieron tres objetivos más para esta investigación se realizó un análisis de regresión lineal para evaluar la relación entre las variables *Makespan*, asignación de recursos (AUF) y Complejidad. Así mismo, se caracterizó una instancia de complejidad alta utilizando el generador de instancias desarrollado por Browning & Yassine, (2016) el cual puede ser utilizado para generar problemas con diferentes complejidades. Además, se caracterizó como instancia un multi-proyecto real del sector de la construcción en Colombia.

Como resultado principal de esta investigación, se obtuvo que las mejores reglas de prioridad para la medida de desempeño *Makespan* son: MS MCS FCFS, MCS, EDD, MS, MINLFT, MINSLK-MINWCS WAP, MINSLK-MINWCS WPP. Por lo tanto se concluye para esta investigación, que las combinaciones dobles y triples mejoran el desempeño en tiempo de los multi-proyectos respecto a las reglas individuales.

Del análisis de regresión lineal se encontró que el factor de utilización media de los recursos (AUF) tiene un impacto positivo en el *Makespan* debido a que a medida que aumenta el uso de recursos dentro del programa también aumenta el tiempo de completamiento del multi-proyecto. Por otra parte, entre las variables *Makespan* y Complejidad se encontró que no existe relación.

A través del generador de instancias se identificó y caracterizó una instancia de complejidad alta, que puede ser utilizada para evaluar métodos de solución al problema RCMPSP en redes de mayor complejidad a las que se probaron en este estudio.

Respecto a la caracterización como instancia del multi-proyecto del sector de la construcción, se concluye que la empresa de la cual se tomó tiene oportunidad de mejora en cuanto a la cultura de gerencia de proyectos ya que no se observó una clara asignación de los recursos en la red de programación.

Como trabajo futuro se propone dar continuidad a esta investigación mediante una siguiente fase, que permita aplicar el método heurístico propuesto en portafolios reales en diferentes sectores. Así como, comparar los resultados obtenidos con otras técnicas modernas de optimización, como algoritmos genéticos, otras heurísticas y metaheurísticas.

INTRODUCCIÓN

La programación de proyectos juega un papel vital en la gerencia de proyectos, y constituye una de las direcciones más importantes tanto en la investigación como en la práctica en el campo de la Investigación operativa (OR) (Kyriakidis, Thomas S, 2012). Así mismo, Pinto y Prescott (1990) consideran que el cronograma es uno de los diez factores de éxito más importantes de la gerencia del proyecto.

La programación de proyectos es considerada entonces como la intersección de la teoría de programación y la gerencia de proyectos, la cual busca determinar cuándo comenzar y finalizar las actividades con el fin de lograr un objetivo predefinido. Minimizar la duración total del proyecto (*makespan*) es, sin duda, el más popular y discutido en la literatura de programación de proyectos. (Kolisch (1996b), Herroelen (2005), Hartmann et al., (2010)).

Los entornos con problemas de múltiples proyectos definen la naturaleza del negocio en la mayoría de las compañías de manufactura, servicios, construcción, hidrocarburos, tecnologías de la información, entre otros. Lova et al., (2001) afirman que el 84% de las empresas trabajan con proyectos múltiples y simultáneos, y Payne (1995) advierte que el 90%, por valor, de todos los proyectos, ocurre en el contexto de proyectos múltiples. Las grandes empresas de construcción, por ejemplo, ejecutan regularmente procedimientos de programación multi-proyectos. (Liberatore et al., 2003).

Se ha demostrado que la efectividad en la asignación de recursos brinda una ventaja competitiva y un valor agregado a las organizaciones con respecto a aquellas que lo hacen de manera ineficiente, por lo tanto, la administración de los recursos de manera eficiente y eficaz es menester para el éxito a largo plazo y la sostenibilidad de las empresas (Karaa F.A., Nasr A.Y., 1986).

Por lo anterior, es importante la investigación en el ámbito del uso efectivo de los recursos en la planeación y composición de los cronogramas factibles y óptimos en tiempo y costo, que es justamente lo que se busca con la solución del problema de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP).

Ahora bien, este problema es conocido como NP-*hard*, lo que significa que no hay algoritmos conocidos para encontrar soluciones óptimas en el tiempo polinomial (Kim et al., 2005). También los métodos matemáticos o analíticos no se utilizan generalmente en la práctica, debido a la complejidad involucrada en su implementación en grandes proyectos, programas y portafolios.

Debido a esta dificultad para encontrar la solución óptima con métodos exactos, la comunidad científica ha explorado recientemente formas alternativas de abordar este problema. Estas metodologías incluyen heurísticas y metaheurísticas, como reglas de

prioridad (PRs) (Browning & Yassine, 2010), algoritmos de optimización de colonias de hormigas (Fink & Homberger, 2013), recocido simulado (Dalfard & Ranjbar, 2012), subastas combinatorias (Araúzo, Pajares & López A., 2010) y algoritmos genéticos (Villafañez, Pajares & López 2010; Song et al., 2016) entre otros.

Browning & Yassine (2010) afirman, que las PRs en la búsqueda de solución al RCMPSP son importantes porque: son utilizadas extensivamente por software de programación de proyectos comerciales debido a su velocidad y simplicidad (Herroelen, 2005); son indispensables para obtener soluciones iniciales para metaheurísticos (Hartmann & Kolisch, 2001) y son necesarias para problemas muy grandes (Kolisch, 1996). Este trabajo busca aportar métodos de solución al problema RCMPSP a través de la combinación de reglas de prioridad.

El presente trabajo de grado hace parte de la investigación en secuenciación de la convocatoria jóvenes investigadores de la Dirección de investigación e innovación de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, y es la fase II del trabajo desarrollado por (Aristizábal, et al., 2017).

La metodología empleada para el desarrollo de la investigación partió de una revisión de literatura mediante la cual se seleccionaron 19 reglas de prioridad, 14 instancias y 10 medidas de desempeño. Utilizando el *software* desarrollado en la investigación adelantada por Aristizábal, et al., (2017), se realizaron las 86.184 posibles combinaciones de dos (2) y tres (3) reglas de prioridad.

A partir de los resultados obtenidos por el *software* para cada una de las medidas de desempeño de todas las combinaciones dobles y triples, se realizó un análisis de medias y un *ranking* global del cual se obtuvieron las reglas con mejor desempeño. Luego se realizó un análisis estadístico con el fin de evaluar la aleatoriedad de los datos obtenidos. Esto para presentar con mayor certeza las mejores reglas o combinaciones, como resultado principal de esta investigación.

Para los tres objetivos restantes, se realizó un análisis de regresión lineal para evaluar la relación entre las variables *Makespan*, asignación de recursos (AUF) y Complejidad. Así mismo, se caracterizó una instancia de complejidad alta utilizando el generador de instancias desarrollado por Browning & Yassine, (2016) y se caracterizó como instancia un multi-proyecto real del sector de la construcción en Colombia.

El documento del trabajo de grado está organizado de la siguiente manera: en los capítulos 1, 2 y 3 se describen el propósito, objetivos y justificación de la investigación; en el capítulo 4 se presenta el marco teórico resultado de la revisión de literatura para el problema RCMPSP; en el capítulo 5 se describe por etapas la metodología; en el capítulo 6 se muestran y analizan los resultados. Finalmente, en los capítulos 7, 8 y 9 se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.

1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE GRADO

Contribuir al aumento de la probabilidad de éxito de la gerencia de proyectos mediante la mejora de las medidas de desempeño en tiempo, a través de la identificación y análisis de metodologías para la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos, que sean aplicables a situaciones reales del entorno productivo colombiano.

2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un método heurístico a partir de la combinación de dos (2) y tres (3) reglas de prioridad (PR), para la solución de Problemas de Programación de Múltiples Proyectos con Recursos Restringidos (RCMPSP).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Combinar y analizar métodos heurísticos basados en reglas de prioridad (PR) y aplicarlos a instancias identificadas en la literatura científica.
- Evaluar el desempeño del método heurístico seleccionado con respecto a cada una de las diez (10) medidas de desempeño e instancias seleccionadas, presentando un ordenamiento de las mejores reglas de prioridad.
- Analizar la relación del uso de los recursos y la complejidad de la red vs la minimización del tiempo de completamiento de un multi-proyectos.
- Identificar y caracterizar una instancia de mayor complejidad que permita la futura aplicación de las mejores reglas de prioridad.
- Caracterizar como una instancia un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia, que permita la futura aplicación de las mejores reglas de prioridad identificadas

3. JUSTIFICACIÓN

El cronograma es probablemente el documento de mayor importancia e influencia en el éxito de los proyectos según Lipke (2008), por medio del cual se hace comprensible el proyecto a todo el equipo de trabajo y se ajusta con exactitud a la realidad de la ejecución del mismo, minimizando los riesgos de desviaciones en tiempo, y buscando una asignación y gestión de recursos correcta que optimice el costo (Aristizábal et al., 2017).

Engwall & Jerbrant, (2003) afirman que la parte más importante de una programación, es la asignación de recursos y la articulación de su trabajo para reducir al mínimo la duración. No obstante, al planear el cronograma, se suelen desconocer algunos factores ambientales en los cuales se desarrollan los proyectos; por ejemplo en los ambientes multi-proyectos, los proyectos se desarrollan simultáneamente y deben compartir algunos recursos.

Los entornos con problemas programación de múltiples proyectos definen la naturaleza del negocio en la mayoría de las compañías de manufactura y servicios. Lova et al., (2001) afirman que el 84% de las empresas trabajan con proyectos múltiples y simultáneos, y Payne (1995) advierte que el 90%, por valor, de todos los proyectos ocurre en el contexto de proyectos múltiples.

Sin embargo, a pesar de que las empresas se desenvuelven en un ambiente de múltiples proyectos, es común ver que los cronogramas se planean y se controlan bajo el supuesto de proyectos individuales, situación que no refleja la realidad durante la ejecución, ya que diferentes proyectos deben competir por la disponibilidad de los recursos que comparten; lo que produce aumentos en la complejidad de la red, entonces ¿Cómo asignar eficazmente los recursos para evitar conflictos entre los proyectos, al tiempo que aumenten la eficiencia de su uso para lograr el propósito de optimizar la duración total?

Estos problemas han sido definidos en el campo de la investigación de operaciones como Problemas de Programación de Múltiples Proyectos con Recursos Restringidos (En inglés: *Resource Constrained MultiProject Scheduling Problem*) (RCMPSP).

Sin embargo, este problema ha sido poco estudiado en la literatura puesto que se evidencia bibliografía para la asignación de recursos a proyectos individuales, conocido por los investigadores como el problema de secuenciación de proyectos con recursos restringidos o RCPSP (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*).

En el campo de los multi-proyectos, varios autores han coincidido en que las técnicas matemáticas de solución exacta para realizar una programación de actividades en ambientes multi-proyectos se vuelven una tarea casi imposible de resolver o consumen una cantidad enorme de tiempo de procesamiento computacional. Por lo tanto, las reglas

de ordenamiento y los heurísticos han sido los métodos más utilizados para resolver problemas RCMPSP (Kumanan, Jose & Raja, 2006).

Debido a que la esencia de RCMPSP se basa en la mejora de los modelos heurísticos a través de las reglas de prioridad existentes, este trabajo busca aportar posibles métodos de solución a dicho problema a través de la combinación de Reglas de Prioridad (PR).

Teniendo en cuenta lo anterior se observa:

- **Necesidad por satisfacer:** las empresas que desarrollan proyectos en ambientes multi-proyectos requieren de modelos heurísticos que le permitan optimizar el tiempo, la asignación y utilización de recursos en su programación.
- **Problema por resolver:** ¿Cómo asignar eficazmente los recursos para evitar conflictos entre los proyectos que se desarrollan en ambientes multi-proyectos, al tiempo que aumenten la eficiencia de su uso para lograr el propósito de optimizar la duración total y la utilización de los recursos?.
- **Oportunidad por aprovechar:**
 - Los cronogramas de proyectos en ambientes multi-proyectos se tratan como un proyecto simple (RCPSP), pero para que los resultados de dicha optimización sean efectivos y cercanos a la realidad es necesario que se desarrollen en el ambiente multi-proyectos. De esta forma se tiene una oportunidad de investigación por aprovechar.
 - Teniendo en cuenta la investigación realizada por Aristizábal et al. (2017), la presente propuesta dará continuidad a la siguiente fase en esta línea de investigación, teniendo la oportunidad de aprovechar los resultados y el *software* obtenidos.

3.1. IMPORTANCIA Y RELEVANCIA DEL TRABAJO DE GRADO

El presente trabajo de grado se enmarca en el énfasis de Gerencia de Proyectos de la Maestría, hace parte de la investigación en secuenciación y programación de proyectos de la convocatoria jóvenes investigadores de la Dirección de investigación e innovación. Su aporte se enfoca directamente en el área de conocimiento de la “gestión del cronograma” cuyo fin es identificar el mejor método de solución al problema de programación de multi-proyectos que comparten recursos restringidos para su ejecución.

El problema de programación de multi-proyectos con recursos restringidos ha sido poco tratado en la literatura, ya que la atención se ha centrado en resolver el problema RCPSP, no obstante la mayoría de las organizaciones modernas desarrollan sus actividades en

un ambiente multi-proyectos en las cuales los recursos son escasos y deben ser compartidos por proyectos que se desarrollan simultáneamente.

Esto genera una situación de competencia entre los proyectos por adquirir los recursos necesarios para su ejecución, creando escenarios ineficientes por posibles sobreasignaciones y falta de priorización, al no contar con una metodología para establecer cual proyecto debe obtener primero los recursos, de acuerdo con los objetivos estratégicos del programa o portafolio de la compañía.

De esta manera, esta investigación aportará un posible método de solución a este problema a través de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR).

Según Payne (1995), hasta el 90% del valor de todos los proyectos se acumula en un contexto multi-proyectos, por lo que el impacto de incluso una pequeña mejora en su gestión, podría proporcionar un enorme beneficio. Adicionalmente, se ha demostrado que los gerentes de proyectos suelen manejar hasta cuatro proyectos a la vez (Liberatore & Pollack-Johnson, 2003; Maroto et al., 1999). Por lo anterior, es importante la investigación en el ámbito del uso efectivo de los recursos en la planeación y composición de los cronogramas factibles y óptimos en tiempo, calidad y costo.

Se ha demostrado que la efectividad en la asignación de recursos brinda una ventaja competitiva y un valor agregado a las organizaciones con respecto a aquellas que lo hacen de manera ineficiente, por lo tanto, la administración de los recursos de manera eficiente y eficaz es menester para el éxito a largo plazo y la sostenibilidad de las empresas (Karaa F.A. & Nasr A.Y., 1986).

Por otro lado, se identificaron situaciones opuestas que consisten en metodologías muy laxas y flexibles que tienen un alto grado de madurez dentro de las organizaciones que conllevan a no pensar de manera holística en el proyecto, lo cual conduce igualmente a situaciones inefectivas (Gerald, 2008).

Sin embargo, la literatura coincide en que las técnicas matemáticas para realizar una programación de actividades en ambientes multi-proyectos se vuelven una tarea casi imposible o consumen una cantidad enorme de tiempo de procesamiento computacional. Las reglas de ordenamiento y los heurísticos se vuelven entonces importantes a la hora de asignar recursos y secuenciar actividades en los proyectos dentro de una organización (Kumanan, Jose & Raja, 2006). Por lo tanto, esta investigación busca a través de la combinación de 2 y 3 reglas de prioridad determinar la mejor regla o combinación de éstas en cuanto a las medidas de desempeño.

3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

La programación de actividades en los proyectos consiste en organizar las actividades y recursos en una secuencia óptima que cumpla con los criterios, metas y objetivos organizacionales. Este conjunto de actividades normalmente tiene restricciones de precedencias, sin embargo, en la práctica se evidencian otras restricciones asociadas a los recursos para su completa realización. Este tipo de problema se define en la literatura científica como la programación de proyectos con recursos restringidos o *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) (Morillo et al., 2014).

La mayoría de los proyectos que se desarrollan dentro de las organizaciones se realizan a través de los programas o portafolios. Se estima que cerca del 90% del valor de todos los proyectos están dentro de un contexto multi-proyectos (Payne JH., 1995). Varios proyectos pueden compartir recursos limitados, sean renovables o no renovables, de forma local o global, centralizada o descentralizada y dependiendo del tipo de recurso disponible. Es por eso que el problema RCMPSP, cobra importancia para las organizaciones que pretenden lograr mayor eficiencia y un óptimo manejo de sus recursos limitados.

De igual forma, se identificó otro problema que afrontan las organizaciones en sus portafolios: los proyectos compiten entre sí dentro de la misma organización por conseguir la mayor porción de recursos con los que la organización cuenta. Los gerentes de proyectos, mediante sus patrocinadores, ejercen presiones para obtener los recursos para sus proyectos, obligando a las organizaciones a asignar porciones pequeñas de los mismos a todos los proyectos con el fin de amortiguar las presiones, dejando de lado un criterio objetivo y estandarizado que garantice una asignación efectiva de los recursos y el logro de los objetivos organizacionales (Anavi-Isakow & Golany, 2003).

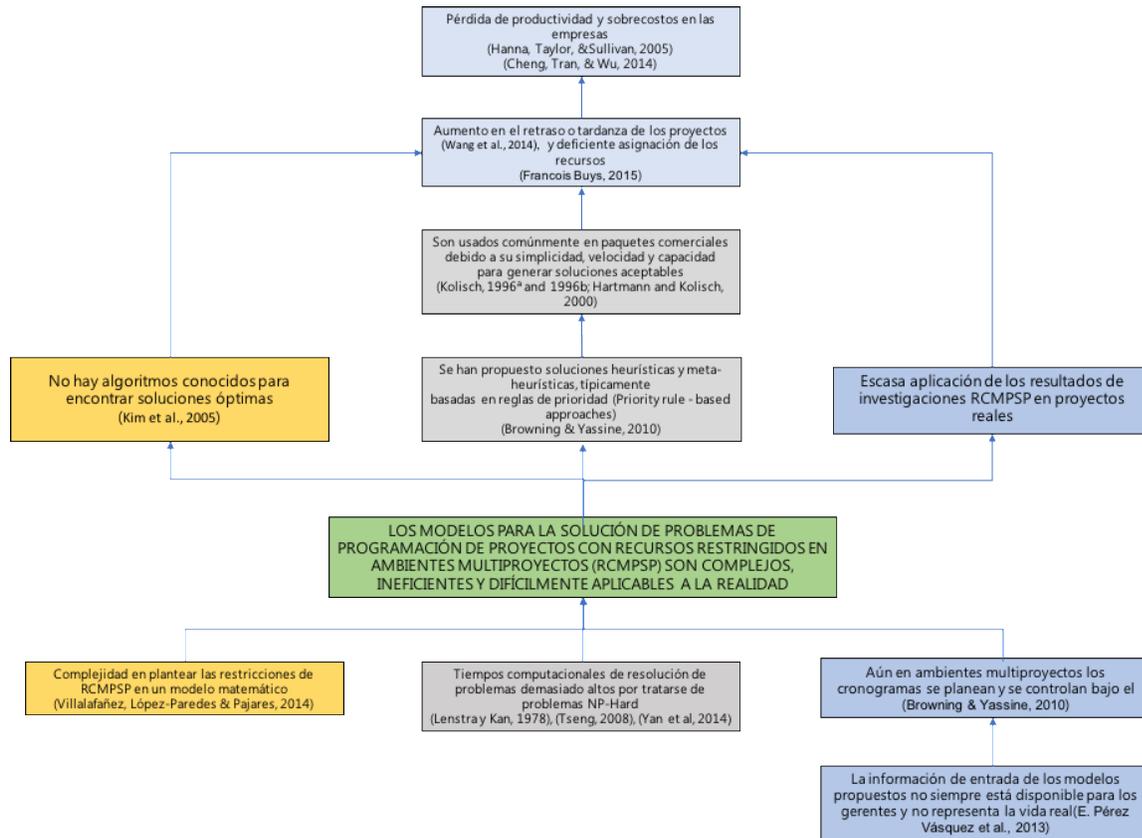
Los problemas RCMPSP son de tipo *Np-hard*, la dureza NP significa que no hay métodos exactos que proporcionen una solución óptima en un tiempo polinomial para cualquier tamaño de un problema determinado. Por lo tanto, se hace imperativa la proposición de nuevos métodos de solución, con mayor capacidad, más veloces con generación de respuestas de buena calidad. Los métodos heurísticos y metaheurísticos otorgan una buena alternativa de solución a este tipo de problema (Krüger & Scholl, 2009).

Según Kolisch & Hartmann (1999), normalmente, el objetivo principal de la programación está asociado a una métrica de tiempo, generalmente a minimizar la duración total del proyecto conocida también como *Makespan*, sin embargo, es frecuente minimizar otras variables como la tardanza media de las actividades (*Program mean leatness*) (A. Viana & J. Pinho de Sousa, 2000). Otros objetivos alternativos pueden ser la robustez del programa, la capacidad de reacción, minimizar costos de los recursos y minimizar el valor presente neto del flujo de caja derivado de la programación (Hartmann & Briskorn, 2010)

3.3. ÁRBOL DEL PROBLEMA.

En la **Ilustración 1** se presenta el problema abordado en esta investigación con sus posibles causas y efectos, teniendo en cuenta la revisión de literatura realizada.

Ilustración 1. Árbol de problema



Fuente: Los autores

4. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de este marco teórico se aborda de la siguiente manera: 1) descripción del problema de programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP), 2) descripción de los antecedentes del problema de programación de multi-proyectos con recursos restringidos (RCMPSP) y descripción de los métodos de solución: exactos y heurísticos, 3) descripción de los principales hallazgos de diferentes autores en la solución del problema RCMPSP y 4) hallazgos sobre combinaciones de reglas de prioridad (PR).

4.1. El problema *RCPSP* (*Resource Constrained Project Scheduling Problem*).

Los proyectos se componen de una serie de actividades planeadas previamente, en donde se asigna el tiempo de ejecución y las cuales consumen recursos dispuestos por las organizaciones, dichos recursos son limitados (Beşikci, Bilge, & Ulusoy, 2014). En las investigaciones del RCPSP se desarrollan programaciones de recursos y secuenciaciones de actividades complejas a partir de métodos exactos, como por ejemplo el método de “ramificación y acotamiento” (en inglés *branch and bound*).

La programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP) es un tipo de problema *NP-hard*, toda vez que se hace prácticamente imposible de resolver eficientemente y en tiempo polinomial con un método exacto, puesto que el espacio muestral de soluciones posibles crece de manera no polinomial con el número de actividades (Morillo et al., 2014).

De acuerdo con lo anterior, el objetivo del RCPSP es programar las actividades y recursos de un proyecto con el fin de minimizar el tiempo total de terminación del mismo o *Makespan*, bajo dos restricciones principales: precedencia de actividades y disponibilidad de recursos (Ballestin, Valls & Quintanilla, 2006).

La primera restricción consiste en que una actividad no puede ser iniciada antes que las actividades de precedencia finalicen. Para la segunda restricción, cada actividad requiere recursos para ser ejecutada y cuando una actividad finaliza, el recurso puede ser renovable y puede estar disponible para comenzar otra actividad (Morillo et al., 2014).

El problema RCPSP se orienta a la búsqueda de soluciones prácticas para la industria, en donde se utilizan métodos heurísticos con el objetivo de lograr resultados satisfactorios con menor tiempo computacional. En la literatura se encuentran diferentes

y variados algoritmos heurísticos, entre los cuales se encuentran principalmente: algoritmos genéticos, colonia de hormigas y algoritmos híbridos (Morillo et al., 2014).

Hartman & Briskorn (2010) realizaron un estudio donde se analizan objetivos y enfoques alternativos para la programación de multi-proyectos, retrasos y valor presente neto; este estudio demostró que el uso de RCPSP no se limita a las aplicaciones en su campo original sino que la programación de proyectos se concibe como una herramienta que permite optimizar los problemas complejos de diferentes áreas, es decir si algún problema se denomina como un problema RCPSP es factible utilizar los métodos de solución del problema de programación de proyectos.

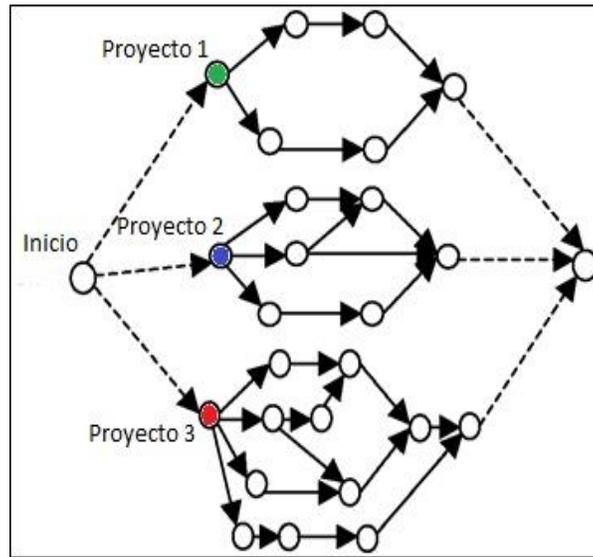
4.2. El problema RCMPSP (*Resource Constrained Multi-project Scheduling Problem*).

La búsqueda de la solución al problema RCMPSP, ha sido importante para lograr mayor eficiencia en el manejo de los recursos en los programas o portafolios con el objetivo de alcanzar beneficios para las organizaciones, ahora bien, este problema es conocido como *NP-hard*, lo que significa que no hay algoritmos conocidos para encontrar soluciones óptimas en el tiempo polinomial (Kim et al., 2005). También los métodos matemáticos o analíticos no se utilizan generalmente en la práctica, debido a la complejidad involucrada en su implementación en grandes proyectos, programas y portafolios.

Debido a esto, se presta más atención a los procedimientos eficaces de solución heurística, que son capaces de obtener rápidamente soluciones aceptables. Se han empleado dos enfoques comunes para programar en RCMPSP usando métodos heurísticos: enfoque de proyecto único o simple y enfoque multi-proyectos (Kurtulus & Davis, 1982).

En la **Ilustración 2** se muestra como en el enfoque de proyecto simple, todos los proyectos individuales se combinan artificialmente en un “gran proyecto”, añadiendo actividades simuladas de inicio y fin.

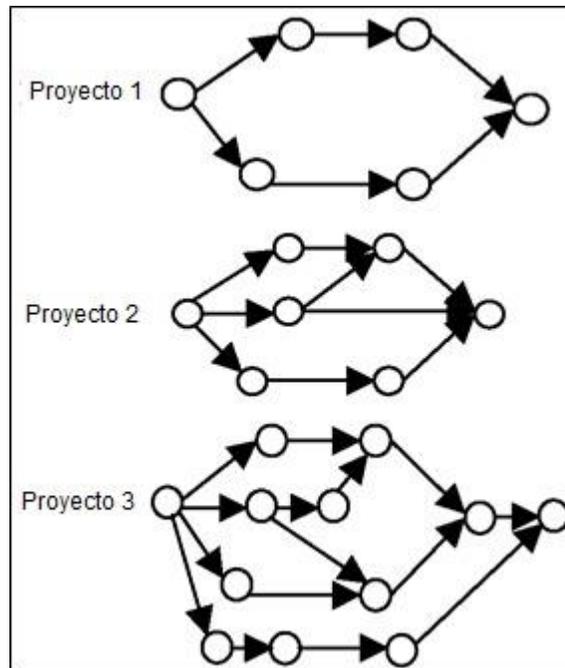
Ilustración 2. Enfoque de proyecto simple



Fuente: (Kanagasabapathi, Rajendran, & Ananthanarayanan, 2009)

En la **Ilustración 3** en el enfoque multi-proyectos, todos los proyectos se mantienen individuales cada uno con su ruta crítica.

Ilustración 3. Enfoque multi-proyectos

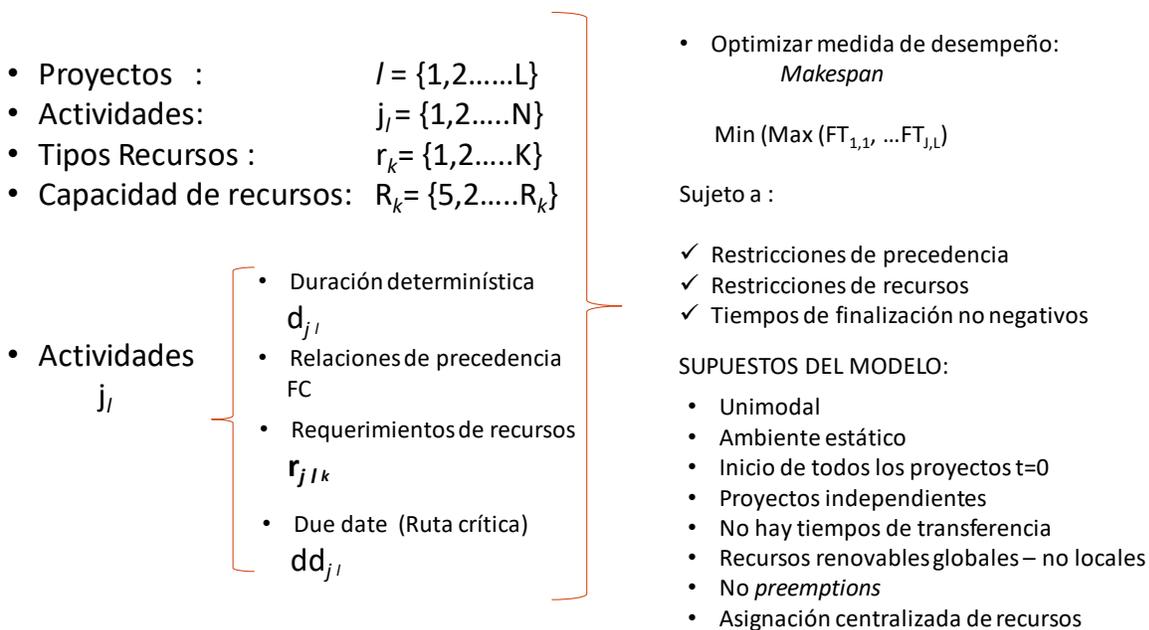


Fuente: (Kanagasabapathi, Rajendran, & Ananthanarayanan, 2009)

De acuerdo con lo anterior, el problema RCMPSP puede ser definido como lo hacen (Yang et al., 2014, p.167) “un conjunto o portafolio de proyectos que inician en el mismo tiempo (estático), cada proyecto contiene una o más actividades, cada actividad necesita un tiempo de procesamiento determinístico y requiere al menos de una unidad de un tipo de recurso, no hay posibilidad de interrumpir el procesamiento (preemption) y los recursos son renovables. Cada actividad no puede empezar si sus actividades predecesoras no han terminado”

(Browning & Yassine, 2010, p. 213) definen el modelo del problema básico RCMPSP como “un conjunto de l proyectos $l = \{1,2 \dots L\}$, cada uno de los cuales tiene un conjunto de N actividades. $i = \{1,2 \dots N\}$. El multi-proyectos tiene un conjunto de tipos recursos globales renovables $r_k = \{1,2 \dots K\}$, con capacidades R_k . Las actividades de cada proyecto tienen unos atributos descritos por: una duración determinística d_{jl} , relaciones de precedencia entre actividades de un mismo proyecto definidas como final comienzo F-C, un requerimiento para cada tipo de recurso r_{jlk} y una fecha límite de entrega o due date dd_{jl} ”, tal como se muestra en la **Ilustración 4**.

Ilustración 4. Modelo Básico del Problema RCMPSP



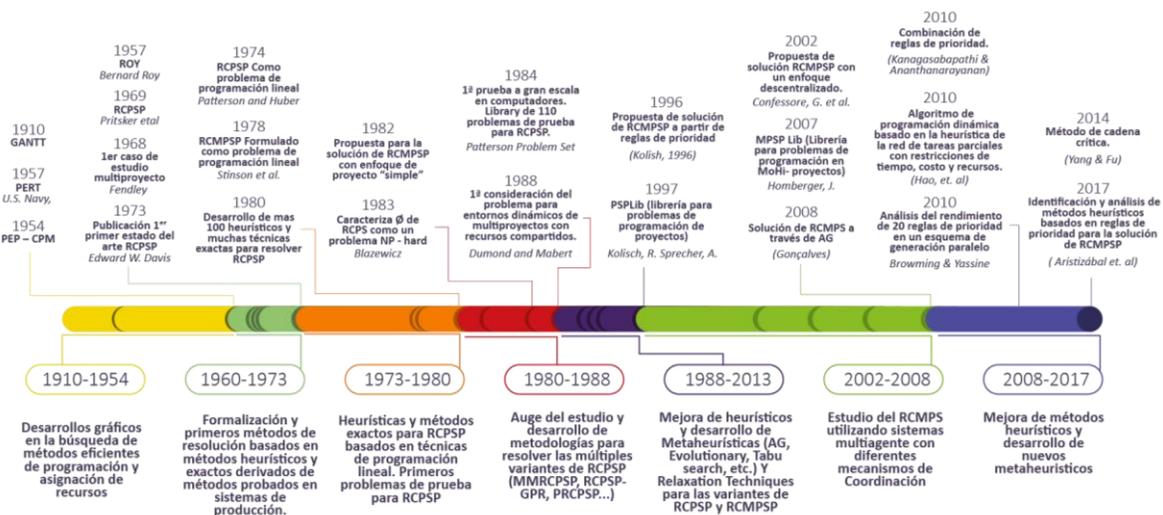
Fuente: Hartman & Briskorn (2010)

La solución al problema consiste en minimizar o maximizar una función objetivo o medida de desempeño que en la mayoría de los casos corresponde al tiempo de terminación o *Makespan* sujeto a unas restricciones de precedencia, de recursos y tiempos de finalización no negativos.

4.2.1. Antecedentes del problema RCMPSP.

Las primeras herramientas para la optimización de la programación de proyectos se basaban principalmente en metodologías de gráficos como: diagramas de Gantt (Gantt, 1919), Harmonygraph (Adamiecki, 1931), planificación de la línea de flujo, métodos de líneas de equilibrio, (Gehring, 1958), cuadros de hitos, etc. Durante la década de los cincuenta, los investigadores desarrollaron los principales métodos basados en la teoría de los gráficos: PERT (Malcolm, Roseboom, Clark & Fazar, 1959), CPM (Kelley & Walker, 1959), ROY (Algan, Roy & Simonard, 1962), PEP (U. S. W. A. D. Division, 1960), PDM (Fondahl, 1961). En la **Ilustración 5**, se muestra una descripción histórica de la programación de proyectos y multi-proyectos en el siglo XX.

Ilustración 5. Línea de tiempo con las etapas e hitos más importantes en el estudio de problemas RCPSP y RCMPSP



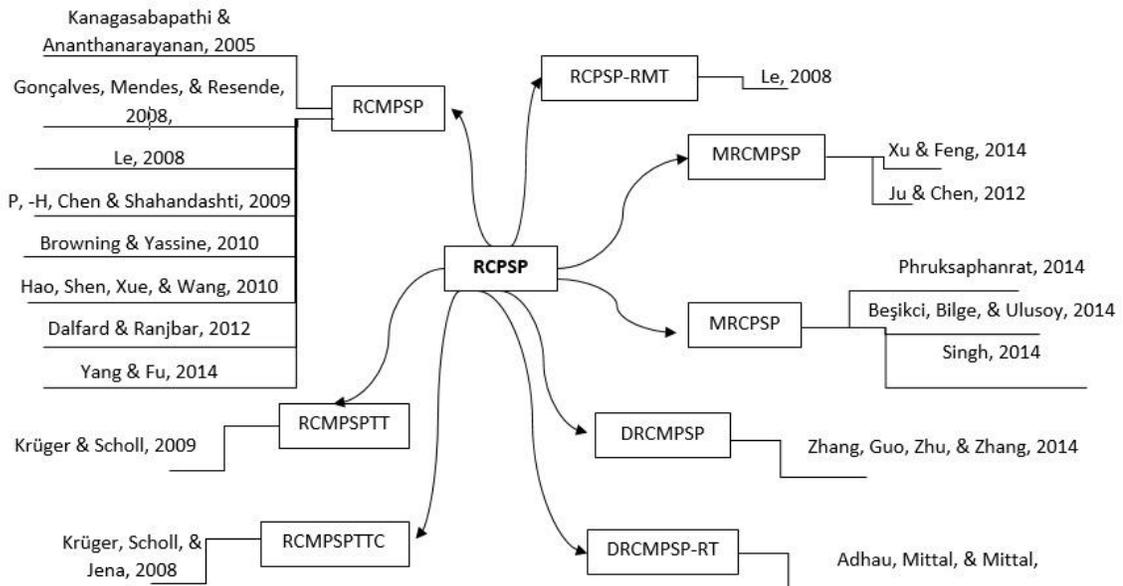
Fuente: (Villañez, López-Paredes, Pajares, & de la Fuente, 2014)

Dichas técnicas lineales comenzaron a ser aplicadas para tratar de resolver estos problemas de programación (Patterson, 1973, Demeulemeester, 1984; y Herroelen 2002). Con los años, este problema comenzó a llamarse problema de programación de proyectos con recursos restringidos (RCPSP) y se convirtió en un campo de investigación en la literatura de Gerencia de Proyectos (Hartmann & Briskorn 2010).

Los primeros métodos, basados principalmente en técnicas de programación lineal (Método Simplex, Métodos de enumeración explícitos o implícitos, como *Branch & Bound*, etc.) (Demeulemeester & Herroelen, 2002), (Patterson, 1973) no podían tratar con restricciones reales más complejas. Es así como a finales de los ochenta aparecen los métodos heurísticos y metaheurísticos, que siguen siendo los más utilizados hasta la

fecha y han buscado resolver el problema RCPSP con nuevas variables como la programación en ambientes multi-proyectos (RCMPSP) entre otros, tal como se aprecia en la **Ilustración 6**.

Ilustración 6. Problema RCMPSP



Fuente: (Chaparro et al.. 2015)

Antes del 2006, la mayoría de las investigaciones entendieron el problema RCMPSP como una extensión del problema RCPSP tal como lo afirmó Gonçalves et al., (2008) en su revisión de literatura. Así mismo, Kumanan et al., (2006) manifestaron que “...La mayoría de las técnicas desarrolladas en el pasado favorecieron la programación de un solo proyecto o multi-proyectos representado como un solo proyecto...”.

Utilizar un solo proyecto como enfoque para resolver problemas RCMPSP tiene varios inconvenientes (Chiu & Tsai, 1993). En primer lugar, es menos objetivo, puesto que involucra implícitamente demoras iguales en todos los proyectos (Kurtulus, 1985). En segundo lugar, el análisis de los proyectos independientes se hace difícil cuando los mismos están relacionados entre sí, por ejemplo, es difícil observar la coincidencia entre los diferentes proyectos y mantener la diferencia de sus rutas críticas. En muchas situaciones, cada proyecto tiene su propio gerente que está interesado en el desempeño del proyecto de manera individual.

Por tal razón, debido a las dificultades para encontrar la solución óptima para el RCMPSP con esta formulación, la comunidad científica ha explorado recientemente formas alternativas de abordar este problema. Estas metodologías incluyen heurísticas y

metaheurísticas, como algoritmos de optimización de colonias de hormigas (Fink & Homberger 2013), recocido simulado (Dalfard & Ranjbar 2012), subastas combinatorias (Araújo et al.. 2010; Villafañez & Poza 2010; Song et al.. 2016), algoritmos genéticos (Pérez et al.. 2015) o sistemas multi agente (Zheng et al.. 2014). Recientemente, las técnicas de aprendizaje estadístico han demostrado ser prometedoras en el campo de la programación de proyectos (Acebes et al.. 2015; Wauters & Vanhoucke 2017), y también en otros campos (Semwal et al.. 2015, 2016, 2017).

Es importante resaltar que Aristizábal et al., (2017) realizaron la identificación y análisis de métodos heurísticos basados en reglas de prioridad para la solución del problema RCMPSP, donde se seleccionaron 18 reglas de prioridad y se aplicaron a 14 instancias que comprenden diferente número de programas con diferente número de proyectos, actividades y recursos. Así mismo, desarrollaron un *software* para calcular las medidas de desempeño y presentar un ordenamiento de las mejores reglas de prioridad. La presente investigación es una continuación de esta primera fase.

4.2.2. Métodos de solución

A continuación se describen los métodos exactos y heurísticos:

4.2.2.1. Métodos Exactos.

Z. Michalewicz & D. B. Fogel (2000) indican que dentro de la categoría de métodos exactos se agrupan los algoritmos que tienen como característica el uso de técnicas analíticas o matemáticas, que aseguran la convergencia a una solución óptima, si ésta existe. Estos métodos son diseñados bajo supuestos y características específicas tales como continuidad, diferenciabilidad, espacio de búsqueda pequeño o linealidad, entre otros. Con base en teoremas matemáticos desarrollan procedimientos que garantizan una solución óptima.

Morillo et al.. (2014) afirman que los métodos exactos no son siempre la respuesta adecuada, ya que presentan varias desventajas que impiden su uso en muchos problemas aplicados. En consecuencia, Z. Michalewicz & D. B. Fogel (2000) afirman que la razón por la cual existen muchos métodos exactos puede deberse a que ninguno de ellos es realmente robusto, es decir, que se pueda aplicar a una gran diversidad de problemas y que siga siendo eficiente en el procedimiento de encontrar la solución óptima. Esta problemática suele ser ocasionada por las características inherentes de un problema, ya que éstas pueden impedir el uso de ciertos métodos exactos y crear la necesidad de elaborar otros más apropiados. Sin embargo, existen problemas que bajo su enfoque no pueden ser resueltos debido a su complejidad o al gran tamaño de su espacio de búsqueda.

A continuación, se citan algunos de los métodos exactos más representativos en la literatura para la solución del RCPSP.

- **Búsqueda Exhaustiva (*Exhaustive Search*).**

Morillo et al.. (2014) indican que este método es tal vez uno de los enfoques más antiguos para solucionar un problema y al mismo tiempo el más robusto de los métodos exactos, ya que tiene la ventaja de poderse aplicar a muchos problemas. Sin embargo, tiene la desventaja de consumir excesivo tiempo de cómputo. Este método requiere generar y evaluar todas las posibles soluciones dentro del espacio de búsqueda factible.

J. Nievergelt (2000) afirma que es una técnica simple y, además, eficiente en algunos problemas pequeños. Se considera útil para los denominados problemas P , cuyo tiempo de cómputo crece de manera polinomial.

Por lo tanto, Morillo et al.. (2014) indica que las aplicaciones de este método para la solución del RCPSP son útiles en problemas muy pequeños; sin embargo, por su naturaleza combinatoria, la búsqueda exhaustiva no es una alternativa viable desde el punto de vista práctico, debido a que problemas pequeños, por ejemplo, de 30 actividades, pueden dar millones de soluciones factibles que conforman el espacio de búsqueda de la solución óptima.

- **Divide y Vencerás (*Divide and Conquer*).**

J. Nievergelt (2000) indica que la esencia de este modelo plantea que un problema aparentemente complicado, podría partirse en subproblemas más fáciles de resolver. Posteriormente, podría aplicarse una forma previamente diseñada para ensamblar o unir las soluciones de los subproblemas para construir una solución global óptima.

Morillo et al.. (2014) afirman que esta metodología es eficiente sólo cuando el tiempo y el esfuerzo requeridos tanto para la partición del problema como para hallar las soluciones de cada subproblema y para el ensamble final de la solución, son menores que los usados para la solución del problema original. Sin embargo, es necesario aclarar que no siempre la unión de las soluciones parciales es la solución del problema completo e incluso no garantiza que sea una solución factible.

En el RCPSP Morillo et al., (2014) indican que puede partirse el problema de muchas formas. Una de ellas es dividir el tiempo en intervalos donde en cada uno se representa un problema de secuenciación de las actividades elegibles no programadas. En este caso la programación final de actividades que se obtiene al ensamblar cada solución parcial sólo será una respuesta factible pero no necesariamente óptima para el problema

original. Además, la complejidad del problema haría necesario dividir muchas veces con lo que podría perderse calidad en la solución del problema original.

- **Programación Dinámica (*Dynamic Programming*).**

R. Bellman (1957) afirma que la programación dinámica es una metodología apropiada para problemas donde deben tomarse decisiones de manera secuencial, por ejemplo, en diferentes periodos de tiempo y en los cuales el orden de las operaciones es crucial. Este enfoque trata de encontrar la solución global para un problema complejo, a partir de las soluciones secuenciales de etapas ya resueltas, mediante un procedimiento recursivo.

A. Mingozzi et al., (1995) afirman que un problema se puede resolver usando programación dinámica si cumple las siguientes características:

- El problema puede descomponerse en una secuencia de decisiones que deben tomarse en varias etapas.
- Cada etapa tiene un número finito de posibles estados (también existe la programación dinámica continua, aunque no aplica para el RCPSP, en este contexto).
- La decisión tomada en cada estado de la etapa actual lleva a algún estado de la etapa siguiente.
- La mejor decisión asociada a una etapa es independiente de las decisiones tomadas en etapas anteriores.
- Debe estar bien definido el costo asociado por pasar de un estado a otro, a través de las etapas; además, esta función de costos debe ser recursiva.

Por otra parte, Morillo et al., (2014) señalan que existen dos enfoques de la programación dinámica: hacia adelante y hacia atrás. En este último, se inicia a partir del objetivo deseado y se hace un análisis hacia atrás; es decir, se toma la mejor decisión de la última etapa para cada valor de la variable de estado; luego, se toma la mejor decisión de la penúltima etapa, teniendo en cuenta los costos agregados de las dos etapas consideradas. Posteriormente, se retrocede una etapa y se repite el proceso hasta llegar a la primera.

- **“Ramificación” y “acotamiento” (*Branch and Bound*).**

Morillo et al.. (2014) indican que *Branch and Bound* se considera un método tan robusto como la búsqueda exhaustiva, pero más eficiente. La idea principal es dividir el espacio factible y buscar sólo en donde se sabe que puede estar el óptimo, desechando los espacios de soluciones factibles que no mejoran la solución actual.

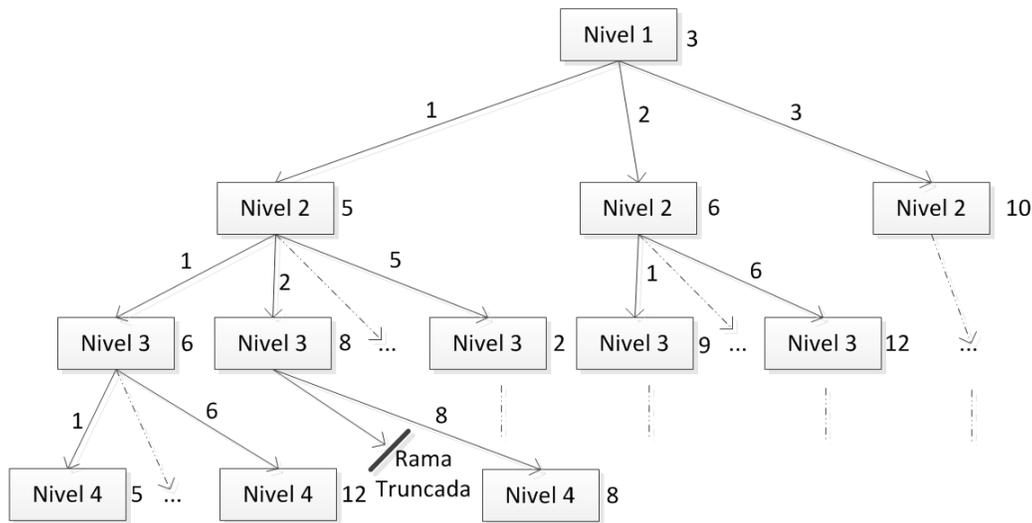
Morillo et al.. (2014) indican que, dentro de los algoritmos exactos, el de ramificación y acotamiento es el que mejores resultados ha mostrado para resolver el RCPSP, afirmando que los enfoques que desean enfrentar este problema con metodologías exactas se dedican más a mejorar este método que a buscar uno nuevo.

J. H. Patterson (1984) publica la librería PSPLIB, desarrollada para evaluar la eficacia y eficiencia de los algoritmos para la solución de problemas de secuenciación y contiene todos los grados de dificultad, basados en los indicadores de complejidad. En este trabajo se demuestra la existencia de muchos problemas relativamente pequeños, 30 y 60 actividades, donde el algoritmo de ramificación y poda se demora muchas horas en hallar la solución.

E. Demeulemeester & W. Herroelen (1992), indican que este modelo realiza la búsqueda de manera organizada y sistemática, creando niveles en los puntos del tiempo donde se liberan recursos, en cada uno de los cuales se genera el conjunto de actividades elegibles, es decir, aquellas actividades no programadas cuyas predecesoras ya terminaron su ejecución. De este conjunto de elegibles se generan todos los subconjuntos de actividades factibles por recursos, de las cuales se selecciona uno, de manera descendente por el número de actividades, para generar soluciones completas. Por esta razón, el algoritmo nunca regresa en el árbol y, por lo tanto, la búsqueda nunca queda estancada.

En la **Ilustración 7** se muestra un esquema de la expansión organizada de las ramas en el algoritmo de *Branch and Bound*. En los nodos o niveles se muestra el número total de conjuntos válidos (ramas que parten de ese nodo o nivel). En cada uno de los arcos se muestra el conjunto válido programado. Por ejemplo, en el nivel 1 del tiempo existen tres conjuntos válidos; si se selecciona el conjunto 1 se da origen al nivel 2 que tiene cinco conjuntos válidos; si en el nivel 1 se selecciona el conjunto 2, se da origen a otro nivel 2 completamente diferente (que puede tener un punto en el tiempo distinto). Estos niveles 2, a su vez, generan los niveles 3 y así sucesivamente.

Ilustración 7. Esquema de la expansión de las ramas en el algoritmo de *Branch and Bound*.



Fuente: (Morillo et al., 2014)

Gonçalves et al., (2004) indican que los métodos exactos se limitan a resolver pequeños casos de problemas y no son prácticos para resolver el RCMPSP debido a la complejidad matemática involucrada en su implementación en grandes proyectos.

Algunos algoritmos y/o métodos exactos utilizados para abordar el RCMPSP son los expuestos por Pritsker et al., (1969), Mohanty & Siddiq (1989), Drexl (1991), Deckro et al., (1991), Vercellis (1994), Demeulemeester & Herroelen, (1997) y Brucker et al., (1999).

4.2.2.2. Métodos heurísticos.

Según lo indicado por Zuloaga (2017), los procedimientos heurísticos se centran en encontrar una solución "buena" en lugar de una óptima. Estos métodos se subdividen en cuatro grupos: 1) heurística basadas en reglas de prioridad (PR), 2) otras heurísticas, 3) metaheurísticas clásicas y 4) metaheurísticas no estándar (Browning & Yassine, 2010).

- **Heurísticas basadas en reglas de prioridad (PR)**

El método más utilizado según la revisión de literatura para resolver el problema RCMPSP es a través de las PR, ya que estas son fáciles de implementar, por lo general fáciles de entender y rápidas en términos de esfuerzo computacional (Brucker et al., 1999). Una Regla de Prioridad (PR) se puede definir en términos prácticos como un criterio que permite decidir qué actividades realizar primero manteniendo el orden lógico de la red de programación. Varias PRs se han probado hasta ahora, las cuales se pueden clasificar según la información que se requiere en: (1) basado en proyectos, (2) basado en actividades, (3) basado en recursos y (4) compuesto (Kolisch, 1996).

Zuloaga (2017), indica que los modelos heurísticos basados en PR están diseñados mediante dos componentes: un esquema de generación de cronograma (SGS) y una regla de prioridad. Además, existen dos esquemas diferentes: en serie y en paralelo. El primero se centra en los incrementos de actividad, mientras que el segundo hace incrementos de tiempo. En cada etapa, el esquema de generación crea un conjunto de decisiones para las tareas que quedan por programar.

Al abordar directamente el problema RCMPSP, Browning & Yassine, (2010) compararon el rendimiento de 20 PR diferentes, usando un esquema de generación paralelo (P-SGS) basado en las características del portafolio tales como: complejidad, contención de recursos y distribución de recursos. Para comparar el desempeño de esas 20 PR, se realizó un estudio donde los factores constantes fueron: 3 proyectos por portafolio, 20 actividades por proyecto y 4 tipos de recursos por tarea. Para tener en cuenta las diferentes características de cada portafolio, se consideraron 7 niveles diferentes de distribución de recursos, 11 niveles de contención de recursos, 4 niveles de complejidad y 2 niveles de variabilidad en la contención de recursos. Los resultados del rendimiento de dichas reglas se observan en el numeral 4.3

De igual manera, Singh (2014) propuso un algoritmo híbrido basado en PR y proceso de jerarquía analítica (AHP). El rendimiento del cronograma de proyectos múltiples se midió en términos del período de transición, así como en términos de la desviación del costo total al comparar la duración real de los proyectos con la duración del camino crítico sin restricciones de recursos. Para definir la secuencia de actividades, solo se usaron PR. Sin embargo, la prioridad del proyecto fue determinada por el AHP, que es un procedimiento para asignar ponderaciones a muchos proyectos diferentes basados en algunas dimensiones predefinidas utilizando un esquema de comparaciones por pares.

Kruger & Scholl (2009), estudiaron el problema teniendo en cuenta el tiempo de transferencia de los recursos. En todas las otras investigaciones mencionadas en esta revisión de la literatura, los recursos pueden ser transferidos de un proyecto a otro sin

ningún tipo de gastos en tiempo y costo. Sin embargo, Kruger & Scholl (2009) incluyeron tiempos de transferencia dependientes de la secuencia y dependientes de los recursos. Este tipo de problema de proyectos múltiples con tiempos de transferencia se identificó como RCMPSPPTT.

- **Otros métodos heurísticos**

Zuloaga (2017), indica que existen otros métodos heurísticos que no pueden clasificarse como heurísticas basadas en PR ni como metaheurísticas. Esta categoría incluye la mejora “hacia adelante-hacia atrás” (*forward-backward*) (FBI), métodos de muestreo (multicriterio) y otros.

Lova, Maroto & Tormos (2000), desarrollaron un método heurístico multicriterio que busca mejorar la asignación de recursos en la programación en ambientes multi proyectos. Este método está dividido en dos fases: La primera fase busca minimizar una variable relacionada con el tiempo, la segunda busca minimizar una variable no relacionada con el tiempo como: la división del proyecto, el inventario en proceso o los recursos inactivos. Después de que ambas fases hayan finalizado, se presenta el cronograma final factible de multi-proyectos.

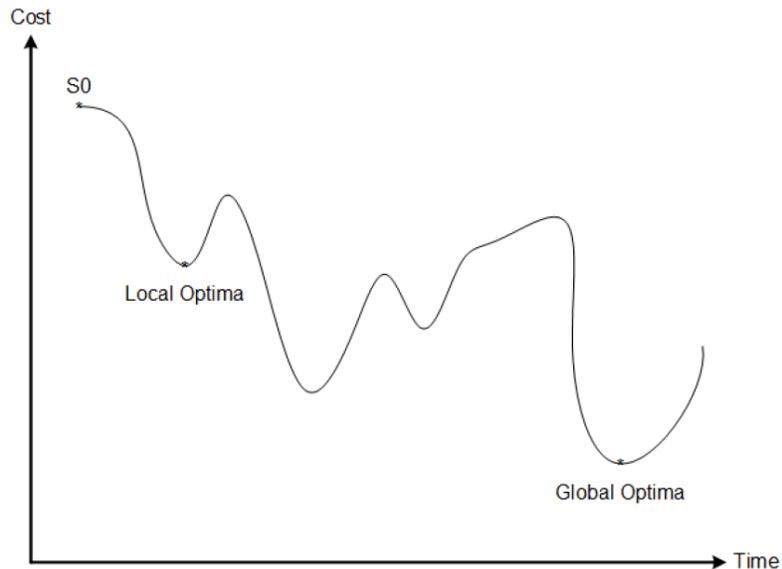
Pensado en un estudio computacional, el autor muestra que el método mencionado alcanza mejores resultados que con los métodos heurísticos basados en PR tales como el contenido total máximo de trabajo y el mínimo tiempo de finalización.

- **Meta-heurística clásica**

Quintero (2017), afirma que las metaheurísticas son algoritmos concebidos para escapar del óptimo local. Son una especie de “plantillas” con algunos componentes que deben ajustarse para cada problema a fin de obtener buenas soluciones. La metaheurística debe incorporar procedimientos de intensificación y diversificación. En la intensificación, las regiones prometedoras se exploran más a fondo con la esperanza de encontrar mejores soluciones. En la diversificación, las regiones inexploradas deben visitarse para asegurarse de que todas las regiones del espacio de búsqueda se exploran de manera uniforme y la búsqueda no se limita a un número reducido de regiones.

La **Ilustración 8** muestra un ejemplo de la evolución de los costos al aplicar metaheurísticas. Una vez que se logra un óptimo local, la metaheurística intenta escapar de él, aceptando soluciones que no mejoran, con la esperanza de encontrar el óptimo global en otra región del espacio de búsqueda.

Ilustración 8. Reducción de costos mediante el uso de metaheurísticas.



Fuente: (Quintero, 2017)

Asimismo, Zuloaga (2017), afirma que existen varios estudios que resuelven el problema RCMPSP mediante la aplicación de un enfoque clásico meta-heurístico. Estos enfoques siguen modelos conocidos que se han aplicado para resolver muchos problemas en diversos campos, tales como: algoritmos genéticos, recocido simulado y búsqueda “tabú” entre otros. Algunos de estos métodos relacionados con la investigación de RCMPSP se describen brevemente a continuación.

En cuanto a Algoritmos genéticos (GA), Holland (1975) fue pionero en el desarrollo de este método, el cual se basa en los principios de la evolución (teoría neo-darwiniana) y las teorías de la selección natural para encontrar, desde una población determinada (soluciones alternativas), los individuos que están bien adaptados (soluciones de mejor rendimiento) a las condiciones ambientales (limitaciones del problema). Para ello, se obtiene una población inicial (al azar) y en cada generación (iteración) se aplican algunos operadores genéticos (cruce, mutación, reemplazo) para encontrar el mejor individuo o población.

Un caso especial para el caso RCMPSP fue estudiado por Besikci, Bilge and Ulusoy, (2014). Esta investigación considera una situación de varios proyectos donde las actividades tienen diferentes modos de uso. Se asigna un presupuesto especial para el portafolio y en lugar de una orden de uso compartido de recursos (RS) entre los diversos proyectos, se considera una dedicación de recursos (RD) para cada proyecto en donde

sólo se puede gastar los recursos asignados sin la posibilidad de acceder a los recursos de otros proyectos del portafolio.

Así mismo, Gonçalves et al., (2006) desarrollaron un algoritmo genético adecuado para la RCMPSP donde la programación se basa en tres cosas: la priorización de las actividades, tiempos de tardanza y las fechas de lanzamiento. El algoritmo fue probado en un conjunto de 10, 20, 30, 40 y 50 proyectos compuestos de 1200, 2400, 3600, 4800 y 6000 tareas, respectivamente.

Zuloaga (2017), indica que otra meta-heurística que se ha aplicado para resolver problemas de programación pertenece al grupo “Inteligencia de enjambre” (*swarm intelligence*), que son meta-heurísticas inspiradas en la naturaleza. Los tres métodos comunes que se han utilizado para resolver el RCPSP y el RCMPSP son: 1) Optimización de Enjambre de partículas (*Particle swarm optimization*) (PSO), 2) la optimización de colonias de hormigas (ACO) y 3) la colonia de abejas artificiales (ABC).

Por otra parte, existe otro método denominado Algoritmos de evolución diferencial (*Differential evolution algorithms*) (DE), el cual es una técnica eficaz que combina operadores aritméticos simples con los operadores clásicos de cruce, mutación y aceptación. Las investigaciones que se han llevado a cabo utilizando DE, son para resolver los problemas de programación del proyecto (Zuloaga, 2017).

- **Los meta-heurísticos no estándar.**

Según Zuloaga (2017), los meta-heurísticos no estándar corresponden a aquellos métodos que se pueden ver como meta-heurísticos, pero no siguen uno de los esquemas clásicos, se han utilizado para resolver el RCPSP, pero no son comunes para el caso de múltiples proyectos.

Una metodología propuesta que se aproxima al RCMPSP fue hecha por Speranza and Vercellis, (1993) usando una clase de procedimiento de ramificación y ligado. En este método, se consideraron dos criterios de rendimiento: VAN y nivel de servicio (expresado como la diferencia entre la finalización de los proyectos y las fechas objetivo-correspondientes). El método se basa en una jerarquía de modelos de optimización de programación entera en el cual se introdujo un procedimiento de bifurcación y enlace para resolver esos modelos.

4.2.2.3. Otras herramientas y métodos

- **Matriz de Estructura de Diseño (*Design Structure Matrix - DSM*)**

La matriz de estructura de diseño (DSM) es una herramienta útil que se ha utilizado, entre otras muchas aplicaciones, para la programación de proyectos para analizar la relación entre las tareas. El DSM se puede utilizar para encontrar las secuencias alternativas de tareas y por lo tanto se ha aplicado ampliamente en la descomposición y la agrupación de proyectos a gran escala. Además, DSM se ha utilizado para indicar qué actividades tiene una probabilidad de retrabajo (Eppinger et al., 1994) y (Smith Eppinger, 1997a).

- **Gestión de Proyectos de Cadena Crítica**

La Gestión de Proyectos de Cadena Crítica (CCPM) es un enfoque de gestión de proyectos desarrollado por Goldratt (1997) y resulta de la aplicación de la teoría de restricciones (TOC) específicamente en entornos de proyectos. CCPM busca eliminar el tiempo de seguridad incorporado en las actividades para proteger la fecha objetivo.

Leach (1999) afirma que CCPM mejora enormemente el cronograma, el costo y el alcance. Debido a estos resultados, se han llevado a cabo investigaciones sobre el método de cadena crítica aplicado a la gestión de proyectos. Sin embargo, al comparar la literatura disponible contra RCMPSP y sus extensiones, las investigaciones son escasas.

- **Sistemas de Agentes Múltiples (MAS)**

Zuloaga (2017), indica que el sistema de agentes múltiples (MAS) se compone de múltiples agentes que interactúan dentro de un entorno y sus interacciones conducen a la aparición de un comportamiento inteligente colectivo. El modelo MAS puede ayudar a encontrar soluciones especialmente en casos donde se lleva a cabo alguna conducta social. Por lo general, el RCMPSP se resuelve con la asunción de una toma de decisiones centralizada en la cual las decisiones de asignación de recursos y programación se ejecutan de manera integrada.

Un enfoque basado en MAS para RCMPSP es el propuesto por Arayzo et al., (2010), el cual busca realizar una planificación dinámica y control en entornos multi-proyectos. Este modelo opera con tres tipos de agentes: gestores de recursos, administradores de proyectos y un agente MAC que actúa básicamente como un subastador. El método

asigna recursos a los proyectos de forma dinámica, y decide sobre el proyecto en cuanto a la posible aceptación o rechazo teniendo en cuenta su impacto en el portafolio existente en términos de valor, la rentabilidad, el horario y la información operacional.

4.3. Descripción de los principales hallazgos de diferentes autores que resuelven el problema RCMPSP.

Browning & Yassine (2010) resolvieron el problema RCMPSP con el método heurístico de PR. En este estudio se definió una fecha de entrega (*due date*) para cada proyecto, basados en la duración de la ruta crítica de sus recursos y midiendo el retraso a partir de ese punto. Los autores resaltan que las prioridades pueden cambiar dependiendo del punto de vista del gerente de proyectos y portafolios. Por ejemplo, un gerente de proyectos se enfoca en los retrasos de un proyecto, mientras que el gerente de portafolio se centra en los retrasos de todo el portafolio de programas. Para poder aplicar las PR, los gerentes deben poder caracterizar sus proyectos en términos de complejidad (C), cantidad de recursos (MAUF) y distribución de los recursos (NARLF). En su estudio, los autores suponen que todos los proyectos inician en el mismo tiempo y analizan el desempeño de 20 PR comunes en la literatura, que han sido desarrolladas exclusivamente para el problema RCMPSP. Se produjeron 246.400 resultados experimentales y se especificaron en términos de cinco funciones objetivos desarrolladas: retraso total del proyecto, retraso promedio del proyecto, porcentaje de retraso promedio del proyecto, retraso total del portafolio y retraso promedio del portafolio.

Con los resultados realizaron un análisis de varianza (ANOVA) para comparar 2 modelos lineales, el primero con cinco factores de utilización media modificada (*Modified Average Utilization Factor*, MAUF), carga de recurso media normalizada (*normalized average resource loading factor*, NARLF), complejidad (*complexity*, C), variación MAUF y PR. El segundo con *average utilization factor* (AUF), *average resource loading factor* (ARLF) en vez de MAUF y NARLF. Los resultados confirmaron que NARLF y MAUF son medidas superiores que ARLF y AUF. Así mismo, se demostró que la mejor Regla de Prioridad (con el menor porcentaje promedio de retraso) fue TWK-LST (*Earliest Late Start Time*). Los autores confirman que esta regla maximiza el contenido total del trabajo (MAX.TWK), lo que significa que considera todos los proyectos simultáneamente, mientras que las otras PR favorecían el proyecto de menor duración o el número de sucesiones dentro de un proyecto.

Finalmente, los autores desarrollaron una tabla de decisiones para guiar a los gerentes en escoger la mejor Regla de Prioridad para diferentes situaciones de proyectos y

objetivos basados en si la cantidad de recursos (MAUF) es alto, bajo o medio, si la distribución de recursos (NARLF) es de carga frontal o trasera (*front or back loading*) y si la complejidad (C) es alta o baja de acuerdo con el número de dependencias.

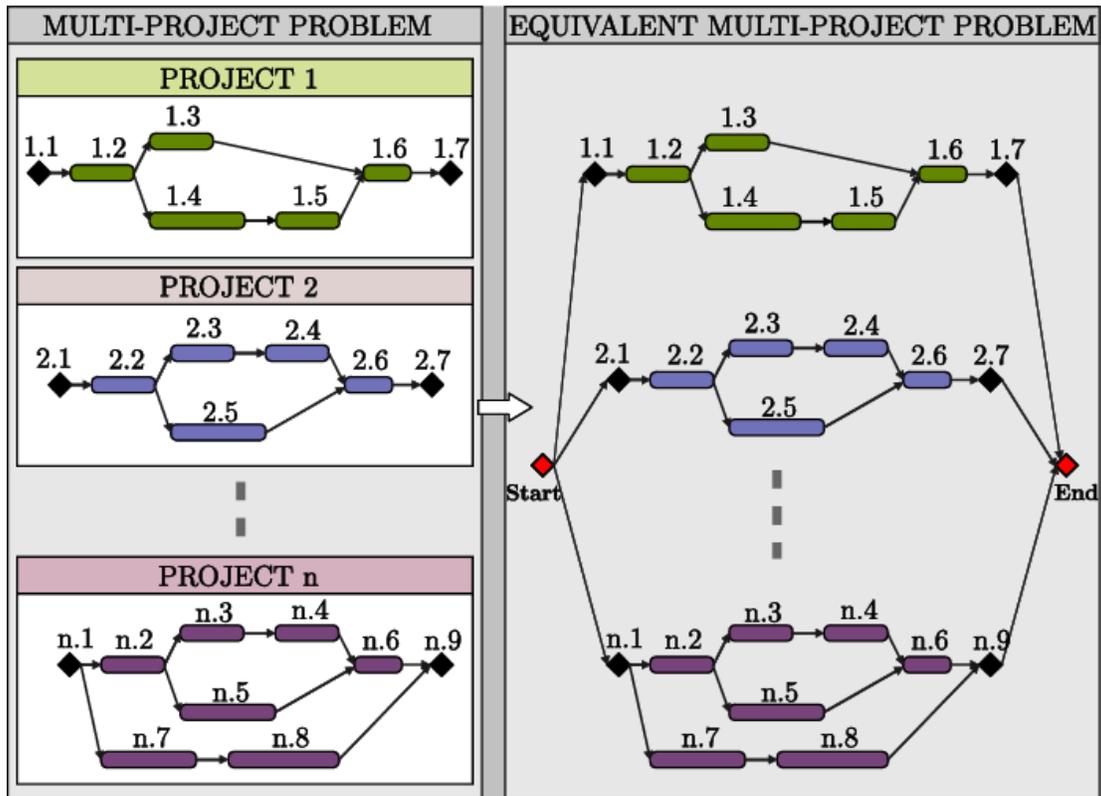
Tal como se mencionó en el numeral 4.2.1 la presente investigación da continuidad a una primera fase, en la cual Giraldo et al., (2017) propusieron una posible solución al problema (RCMPSP) y el uso de poblaciones iniciales para AG utilizando también el método heurístico de PR. Analizaron 19 PR conocidas, con 14 instancias diferentes con algunas características como: actividad en nodo, duraciones determinísticas y recursos globales limitados, y como funciones objetivo: Tiempo de duración total mínimo (*minimum Total Makespan*) (TMS), retraso promedio del proyecto (*average project delay*) (APD) y tiempo computacional (Tc).

Para el caso de TMS, las mejores PR fueron MS, MINLFT y EDD, para el conjunto de las 14 instancias seleccionadas. En el caso de APD las mejores PR fueron MINLFT, MS y EDD. Finalmente, para el tiempo computacional Tc, las mejores reglas fueron TWF. EST, WPP y SASP.

La mejor regla de prioridad en general, con la cual se lograron minimizar todas las medidas de desempeño fue MS (*Maximum Successors*). Esta regla de prioridad está basada en actividad, es decir, toma en cuenta los atributos de las actividades y no su uso de recursos. El buen comportamiento de esta regla de prioridad en todas las medidas de desempeño se debe a que al dar prioridad a las actividades que tienen mayor número de sucesoras, está indirectamente dando una prioridad por “transitividad” a todas las actividades que se encuentran a continuación en la red, disminuyendo la posibilidad de retrasos.

Villafáñez et al., (2018) desarrollaron el algoritmo P-SGS/MIN-SLK que fue creado a partir del método propuesto por Kolish para resolver el problema RCPSP (*mono-project case*) (Kolisch & Hartmann 1999; Hartmann & Kolisch 2000) y a diferencia de otros métodos está formulado para resolver cualquier problema de programación, no alguno en específico; de acuerdo con los autores este algoritmo es mejor en un 16% de los casos estudiados en la biblioteca MPSPLib de Homberger (2007), la cual actualmente es la más aceptada y usada para evaluar y comparar diferentes algoritmos de RCMPSP. Este algoritmo es un método centralizado tal como se ve en la **Ilustración 9**.

Ilustración 9. Descripción conceptual del enfoque centralizado para el RCMPSP (C-RCMPSP)



Fuente: (Villafañez et al., 2018)

4.4. Hallazgos sobre combinaciones de reglas de prioridad (PR)

A continuación, se presenta una descripción de las investigaciones encontradas para combinación de PR en orden cronológico.

Barrett & Barman (1986), estudiaron un entorno simple de procesamiento de dos etapas, observaron que la combinación entre SPT y EDD minimizaba la tardanza promedio y superaba la regla SPT tanto en el tiempo de flujo como en las variaciones de retraso.

Barman & LaForge (1988) y LaForge & Barman (1989) encontraron que el uso selectivo de diferentes PR en diferentes etapas de procesamiento puede tener un impacto positivo en el rendimiento de la instancia. Específicamente, los esquemas de prioridad con una

“orientación de rendimiento” temprano y una “orientación de fecha de vencimiento” más adelante en el proceso fueron muy efectivos. Los resultados en LaForge & Barman (1989) sugieren que las medidas de la media y la varianza del tiempo de flujo, la tardanza y la tardanza media se ven afectadas por las combinaciones de PR.

Dooley (1990) combinó tres reglas simples de prioridad en un sistema de fabricación de tres estaciones de trabajo y se demostró que SPT y EDD en las estaciones de trabajo de salida produjeron mejores resultados que la regla SPT de referencia. Sin embargo, una estrategia pura con la regla EDD superó a todas las otras heurísticas en la medida promedio de llegadas tarde.

Otros dos estudios de Dooley (1990) y Mahmoodi, Mosier & Guerin, (1996), proporcionaron información adicional sobre la aplicación simultánea de diferentes PR en diferentes etapas de procesamiento.

Boctor (1993) estudió diferentes combinaciones de PR para el MRCPSM mediante la selección de actividades según PR donde se experimentaron tres reglas de selección de modo: el modo factible más corto (SFM), la relación de menor criticidad o el recurso menos crítico (LCR) y la proporción de recursos mínima (LRP).

Mahmoodi, Mosier & Guerin (1996) afirmaron que las investigaciones anteriores que estudiaban las combinaciones de PR simple en diferentes etapas de producción no contenían análisis estadísticos de los resultados. Por lo tanto, realizaron un experimento, analizado por métodos ANOVA, para estudiar el tema más a fondo. El experimento consistió en 28 combinaciones de reglas heurísticas, tres estructuras de instancias diferentes con dominancia de flujo, dos niveles de carga de taller y dos niveles de estanqueidad de fecha de vencimiento. Las medidas de rendimiento fueron el tiempo medio de flujo, la tardanza promedio y la tardanza porcentual promedio.

Como resultado del estudio de Mahmoodi, Mosier & Guerin (1996), se demostró una mejora estadísticamente significativa en las medidas de rendimiento promedio cuando se usaron varias combinaciones de heurísticas en lugar de las reglas “puras”. Además, los resultados indicaron que la estructura de la instancia tuvo un impacto mucho menos importante en el rendimiento de las combinaciones de PR que la carga de la instancia.

Sin embargo, los resultados del estudio de Mahmoodi, Mosier & Guerin (1996) deben considerarse con cautela ya que los investigadores no abordaron la varianza en las medidas de rendimiento. El procedimiento ANOVA que emplearon supone que el rendimiento medio (tiempo de flujo / retraso / retraso porcentual) es el único criterio relevante, y que la varianza de cada medida de rendimiento permanece constante en las diversas situaciones experimentales.

El desarrollo de nuevas PRs basado en la combinación ponderada de éstas fue propuesto por Tsai & Chui (1996) quienes crearon la regla LSSA (*The minimum weighted*

latest start time and scheduling activity time first) a partir de la suma ponderada de LST y SASP presentando el método de combinación ponderada. Los autores se basan en la premisa de que los proyectos están programados mediante el uso de una combinación de dos o tres PRs que no tienen el mismo peso; se prueban varios pesos y se escogen los que presentan mejor desempeño (mínimo retraso total del proyecto). Este peso (W) se encuentra normalmente entre 0 y 1.0 con incrementos de 0.1.

Es así como Tsai & Chui (1996) dieron origen a la regla LSSA de acuerdo con la siguiente combinación ponderada:

$$LSSA = \min(LSSA_{ij}), \text{ donde}$$

$$LSSA_{ij} = W(LST_{ij}) + (1 - W)(SA_{ij})$$

Kanagasabapathi, Rajendran, & Ananthanarayanan (2009) siguiendo el método propuesto por Tsai & Chui (1996) desarrollaron 10 PRs y evaluaron su desempeño en términos del mínimo retraso total del proyecto. A continuación, se presentan algunos ejemplos de estas reglas:

- OPS-OAS (*Operational Project Slack and Operation Activity Slack*)
- DD-ODD (*Due Date and Operation Due Date*)
- TWKR-LST (*Total Work Content Remaining and Latest Start Time*)
- TWKR-ODD (*Total Work Content Remaining and Operation Due Date*)

Kanagasabapathi, Rajendran, & Ananthanarayanan (2010), realizaron estudio que abordó el problema de programación de proyectos múltiples con recursos limitados suponiendo el adelanto relativo y costos relativos de tardanza, la investigación se realizó en dos fases, utilizando 12 PR existentes y desarrollaron 14 PR las cuales son:

- Reglas existentes
 - Regla de operación más corta ponderada primero (W (SOF))
 - Regla de holgura mínima ponderada (W (MINSLK))
 - Actividad más corta ponderada de la regla del proyecto más corto (W (SASP))
 - Regla de contenido de trabajo total máximo ponderado (W (MAXTWK))
 - Regla del tiempo de finalización mínima ponderada (W (MINLFT))
 - Regla de proporción crítica ponderada (W (CR))
 - Contenido de trabajo total ponderado - última regla de hora de inicio (W (TWK-LST))
 - Contenido de trabajo total ponderado - regla de tiempo de inicio más temprano (W (TWK-EST))

- Regla de tiempo de actividad mínimo y tiempo de actividad de planificación (W (LSSA)) mínimos ponderados más recientes
 - Regla de contenido de trabajo total ponderado restante (W (TWKR))
 - Límite inferior en la regla de costo de tardanza (W (LBT)) (utilizada en la primera fase del estudio actual)
 - Límite inferior en la regla de costo de precocidad y tardanza (W (LBE + LBT)) (utilizada en la segunda fase del estudio actual)
- Reglas desarrolladas
 - Regla de fecha de vencimiento dinámica ponderada (W (DDD))
 - Regla de fecha de vencimiento operativa ponderada (W (ODD))
 - Regla de holgura del proyecto operativo ponderado (W (OPS))
 - Regla de holgura ponderada de la actividad operacional (W (OAS))
 - Negativa del funcionamiento operativo ponderado del proyecto y ponderación de la actividad operativa ponderada (W-OPS-OAS)
 - Fecha de vencimiento ponderada y fecha de vencimiento operativa ponderada (W-DD-ODD)
 - Fecha de vencimiento dinámica ponderada y fecha de vencimiento operativa ponderada (W-DDD-ODD)
 - Regla de tiempo de trabajo total ponderado restante y ponderado de la última hora de inicio (W-TWKR-LST)
 - Contenido de trabajo total ponderado restante y fecha de vencimiento operativa ponderada (W-TWKR-ODD)
 - Contenido del trabajo total ponderado restante y regla de tiempo de finalización dinámica ponderada más temprana (W-TWKR-DECT)
 - Regla de fecha de vencimiento total ponderada del contenido de trabajo total ponderado (W-TWKR-DD)
 - Contenido de trabajo total ponderado restante y regla de fecha de vencimiento dinámica ponderada (W-TWKR-DDD)
 - Contenido de trabajo total ponderado restante y regla de holgura del proyecto operativo ponderado (W-TWKR-OPS)
 - 9Contenido de trabajo total ponderado remanente y regla de holgura ponderada de actividad operativa (W-TWKR-OAS)

En la primera fase, se consideraron costos relativos con ponderaciones de tardanza de los proyectos y las PR se utilizaron para minimizar la tardanza ponderada de los mismos, calculando dos medidas de desempeño en la Ecuación (1) y en la Ecuación (2) Tardanzas ponderadas máximas

$$(WMT) = \frac{\sum_{i=1}^I \max (CT_i - DD_i; 0) \times r_i}{\sum_{i=1}^I r_i} \quad (1)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

$$(MaxWT) = \max_{1 \leq i \leq I} (\max(CT_i - DD_i; 0) \times r_i) \quad (2)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

Obteniendo como resultado que las PR: Wr-TWKR-ODD y Wr-TWKR-LST funcionan bien en la mayoría de las configuraciones experimentales en términos de minimizar el WMT de proyectos en diferentes combinaciones de proyectos.

En cuanto a las tardanzas ponderadas máximas (MaxWT) Las reglas propuestas Wr-OPS-OAS, Wr (OPS) y Wr (OAS) funcionan bien al minimizar los valores máximos ponderados de tardanza para la mayoría de los ajustes experimentales con todas las combinaciones de proyectos.

En la segunda fase el objetivo era la minimización de la suma de adelantos ponderada y la tardanza ponderada de los proyectos, y las PR se utilizaron incorporando costos relativos de adelanto y tardanza de los proyectos, calculando seis medidas de desempeño:

$$(WMT') = \frac{\sum_{i=1}^I \max(CT_i - DD_i; 0) \times r_i}{\sum_{i=1}^I r_i} \quad (3)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

$$(MaxWT') = \max_{1 \leq i \leq I} (\max(CT_i - DD_i; 0) \times r_i) \quad (4)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

$$(WME^c) = \frac{\sum_{i=1}^I \max(DD_i - CT_i; 0) \times e_i}{\sum_{i=1}^I e_i} \quad (5)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

$$(MaxW^c) = \max_{1 \leq i \leq I} (\max(CT_i - DD_i; 0) \times e_i) \quad (6)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

$$(WMSC^{e,r}) = \frac{\sum_{i=1}^I \max(DD_i - CT_i; 0) \times e_i}{\sum_{i=1}^I e_i} + \frac{\sum_{i=1}^I \max(CT_i - DD_i; 0) \times r_i}{\sum_{i=1}^I r_i} \quad (7)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

$$(MaxTSC^{e,r}) = \max_{1 \leq i \leq I} (\max(DD_i - CT_i; 0) \times e_i) + \max_{1 \leq i \leq I} (\max(CT_i - DD_i; 0) \times r_i) \quad (8)$$

Fuente: Tsai & Chui (1996)

En donde se obtuvieron los siguientes resultados para las medidas de desempeño:

Para costo de planificación de la media ponderada ($WMSC_{e,r}$) la reglas $W_{e,r}$ -TWKR-ODD y $W_{e,r}$ -TWKR-LST son la de mejor funcionamiento en la mayoría de los casos en términos de minimizar la suma promedio ponderada de adelanto ponderado relativo y la tardanza ponderada de los proyectos en diferentes combinaciones de proyectos, cuando el vencimiento la configuración de fecha y los grados de hermeticidad de recursos son ajustados.

En relación con el costo máximo de programación total ($MaxTSC_{e,r}$) la mejor regla fue la $W_{e,r}$ -OPS-OAS, seguida por $W_{e,r}$ (OPS) y $W_{e,r}$ (OAS) en todos los escenarios experimentales para todas las combinaciones de proyectos.

Tanto Tsai & Chui (1996) como Kanagasabapathi, Rajendran, & Ananthanarayanan (2009) concluyen que las reglas desarrolladas a partir de la combinación ponderada de otras, tienen mejor desempeño que las reglas individuales.

5. METODOLOGÍA

Esta sección comienza con el planteamiento de la pregunta de investigación que ocupa este estudio, seguido de una descripción del tipo de investigación y el diseño experimental seleccionado, finalizando con una explicación detallada de las etapas desarrolladas.

5.1 Pregunta de Investigación

¿Cuál de las combinaciones de reglas de prioridad tiene el mejor desempeño en cuanto tiempo y utilización de recursos en ambientes multi-proyectos?

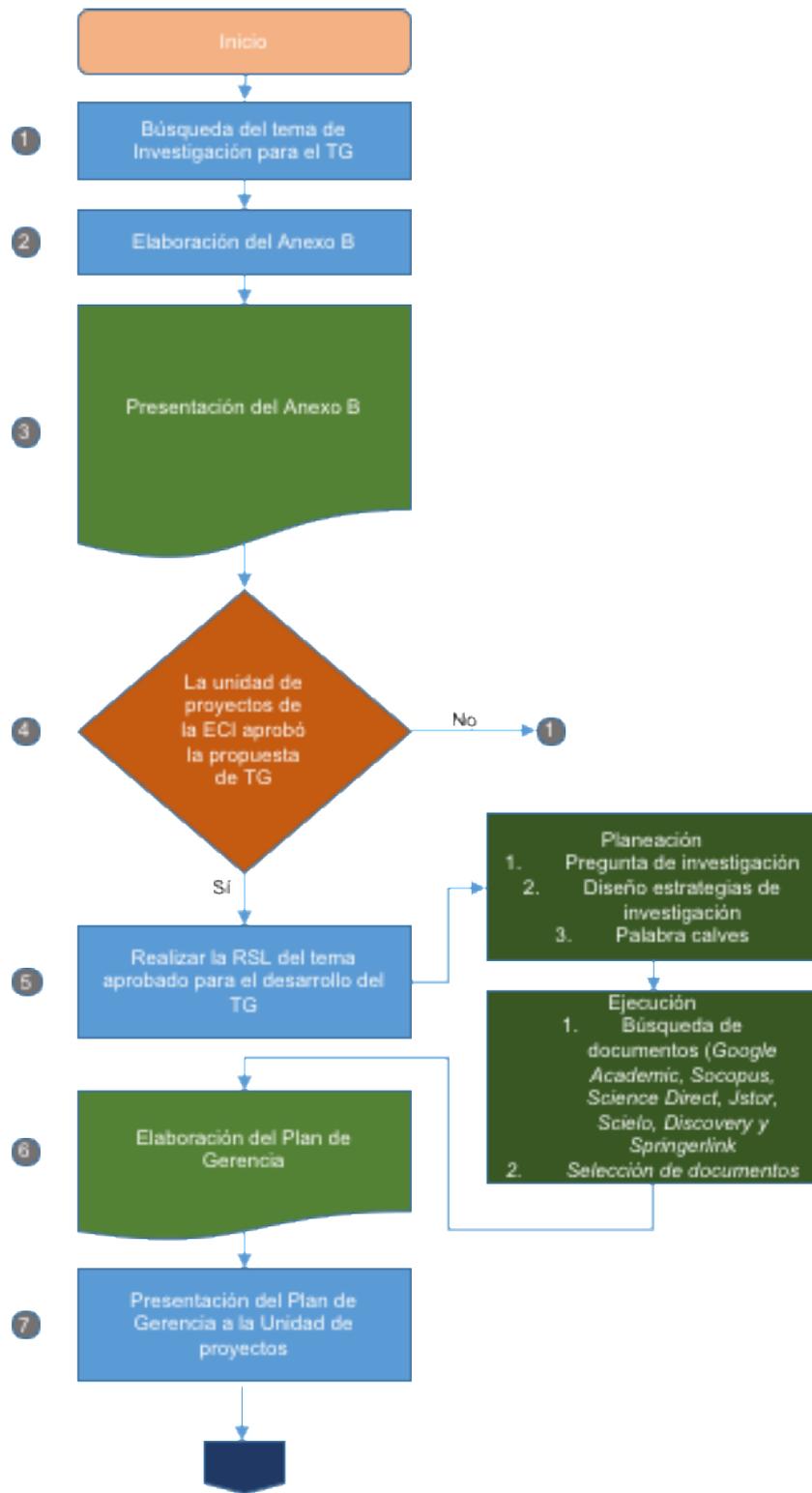
5.1.1 Tipo de investigación

El enfoque cuantitativo de investigación según Hernández (2014) parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones respecto de la o las hipótesis. De acuerdo con esta definición y las características de esta investigación, se puede definir entonces como de tipo cuantitativo.

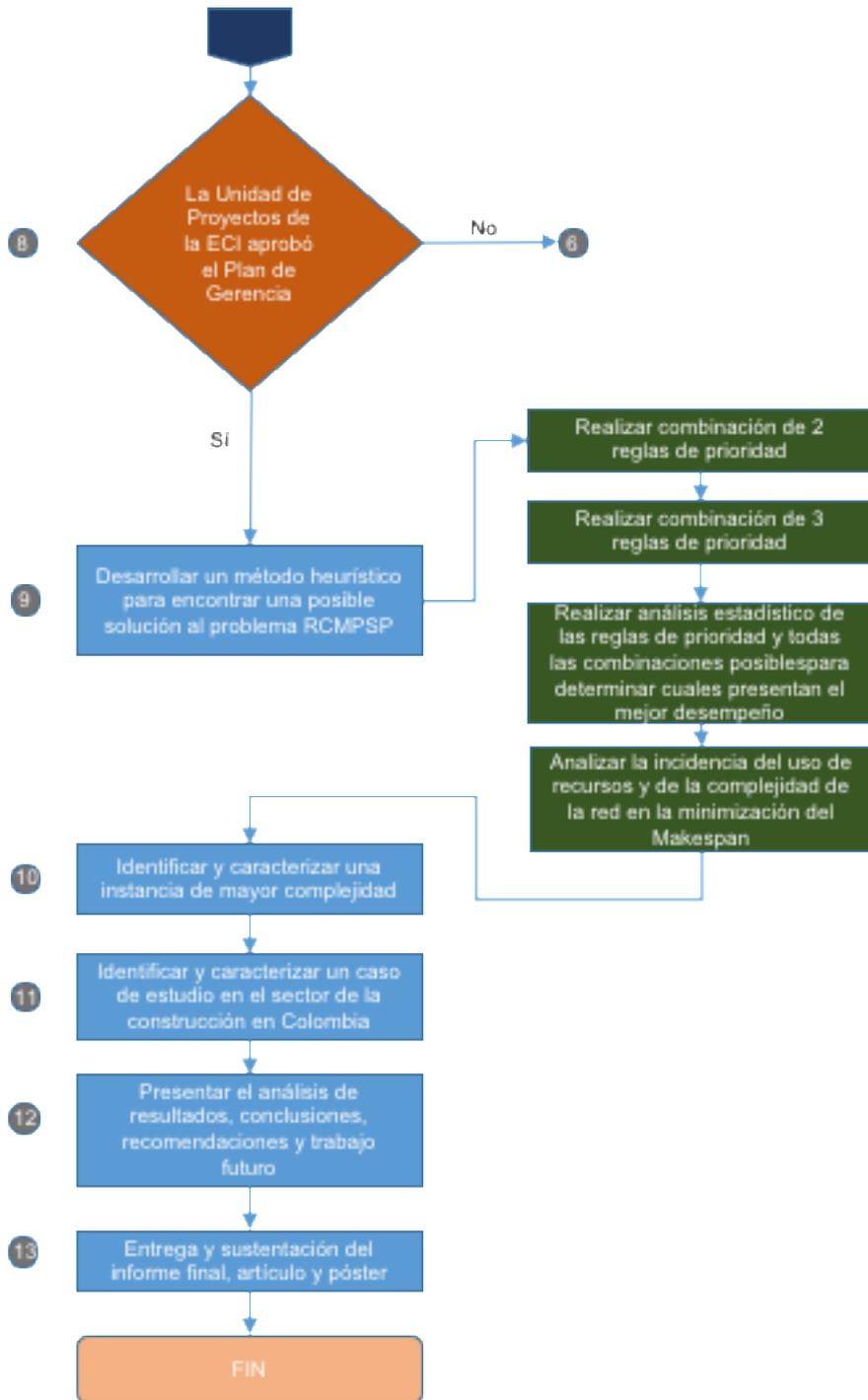
5.1.2 Etapas de la Investigación

En la **Ilustración 10** se presenta un diagrama de proceso de las etapas desarrolladas en la presente investigación.

Ilustración 10. Diagrama de proceso etapas de la investigación



Continuación Ilustración 10



Fuente: Los autores

5.1.2.1 Inicio

El objetivo de esta fase es la elaboración, presentación y aprobación del Anexo B que contiene la propuesta de trabajo de grado.

5.1.2.2 Planeación

Esta fase comienza con una RSL y durante la misma se elabora y sustenta el plan de gerencia del proyecto.

- **Revisión Sistemática de Literatura (RSL) actualizada al problema RCMPSP**

Tomando como referencia la investigación realizada por Aristizábal et al., (2017), sus conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro, y con el fin de darle continuidad se adelantó esta RSL.

Para la revisión sistemática de la literatura se utilizaron principalmente los siguientes motores de búsqueda: *Google Academic, Scopus, ScienceDirect, Jstor, Scielo, Discovery y Springerlink*. Se buscó información relacionada con la solución del problema RCPSP y RCMPSP dentro de la secuenciación de proyectos a través de métodos heurísticos, especialmente con PR y combinaciones de las mismas. El acceso a las bases de datos y la descarga de los documentos a revisar se hizo por medio de la biblioteca de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

La recopilación de artículos, libros, trabajos de grado y demás documentos para la investigación se realizó de la siguiente manera:

1. Planeación

a. Se elaboraron las siguientes preguntas para la investigación:

¿Cuál de las combinaciones de reglas de prioridad tiene el mejor desempeño en cuanto a tiempo y utilización de recursos en ambientes multi-proyectos?

¿Cómo asignar eficazmente los recursos para evitar conflictos entre los proyectos al tiempo que aumenten la eficiencia de su uso para lograr el propósito de optimizar la duración total?

b. Diseño estrategias de investigación.

i. Criterios de inclusión de artículos:

1. Artículos relacionados con RCMPSP e instancias de mayor complejidad.
 2. Artículos relacionados con combinación de PRs.
 3. Artículos publicados en revistas indexadas.
 4. Haber sido publicados en los últimos 15 años.
- ii. Criterios de exclusión de artículos
1. Con más de 15 años de publicación.
 2. Tratar únicamente RCPSP.
- iii. Evaluación calidad de artículos: en la selección de artículos como criterio de calidad se fijó que las revistas especializadas en las cuales se encuentren publicados los artículos se clasifican según calidad de Q₁ a Q₄ de acuerdo al ranking encontrado en el enlace www.scimagojr.com/journalrank.php. Donde Q₁ a Q₄ son los cuartiles en los cuales se encuentran clasificados las revistas (*journals*) de mayor a menor número de citaciones o referencias de sus publicaciones.
- c. Una vez elaboradas las preguntas de investigación y establecidos los criterios se definieron las palabras clave y sus combinaciones así:

Keywords: Algorithm, Allocation, Chain, Coding, Combinations, Constrained, Critical, Heuristic, Hierarchical, Hybrid, Management, Metaheuristics, Multi-Project, Optimization, Planning, Preemption, Priority, Programme, Project, Resource, Rules, Scheduling, Task.

Palabras Clave: Algoritmo, Asignación, Cadena, Combinaciones, Restringido, Crítica, Heurístico, Jerárquico, Híbrido, Gestión, Metaheurístico, Multi-proyectos, Optimización, Planificación, Priorización, Programa, Proyecto, Recursos, Reglas, Programación, Tareas.

Composed Keywords: Critical Chain, Hierarchical Coding, Hierarchical Scheduling, Hybrid Algorithm, Genetic Algorithm, Multi-project Scheduling, Multi-project scheduling optimization, Priority Rules Combinations, Project Management, Project Scheduling, Resource Allocation, Resource Constrained Multi-Project Scheduling Problem, Resource Constrained Priority Rules, Resource Constrained Projects, Resource Management, Scheduling Optimization.

Palabras clave combinadas: Cadena crítica, Programación Jerárquica, Algoritmo Híbrido, Algoritmo Genético, Programación Multi-proyectos, Optimización de Programación, Combinación de P, PRs, Gestión de Proyectos, Programación de Proyectos, Asignación de Recursos, Problema

de Programación Multi-proyectos con Recursos Restringidos, Reglas de priorización para Recursos Restringidos, Proyectos con Recursos Restringidos, Gestión de Recursos, Optimización de Programación.

2. Ejecución Revisión Sistemática de Literatura

- a. Búsqueda de documentos: En la búsqueda en las bases de datos mencionadas anteriormente se encontraron alrededor de 100 artículos relacionados con la investigación y los cuales se registraron en un archivo Excel describiendo lo siguiente: Base de datos, Palabra clave, Título del Documento, Autores, Año de publicación, Fuente, Tipo de Documento, y Descargado o no Descargado.
- b. Selección de documentos: En primer lugar, se tuvieron en cuenta los artículos seleccionados por Aristizábal et al., (2017), como base para la investigación. En segundo lugar, con la información acopiada se seleccionaron los documentos relacionados con el problema RCPSP y RCMPSP dentro de la secuenciación de proyectos a través de métodos heurísticos, especialmente con PRs y combinaciones de acuerdo con los criterios y exclusiones, para la elaboración del marco teórico y la investigación, en la **Tabla 1** se presentan los documentos seleccionados:

Tabla 1. Artículos seleccionados.

Autor	Título del Documento	Año
Samir Barman	The impact of priority rule combinations on lateness and tardiness	1998
Araújo, Pajares, & López-Paredes	Simulating the dynamic scheduling of project portfolios. Simulation Modelling Practice and Theory	2010
Beşikci, Bilge, & Ulusoy	Multi-Mode Resource Constrained Multi-Project Scheduling and Resource Portfolio Problem	2015
Browning, Tyson R., & Ali A. Yassine.	Random Generator of Resource-Constrained Multi-Project Network Problems.	2010
Chiu, H.N., Tsai, D.M.	A comparison of single-project and multi-project approaches in resource constrained multi-project scheduling problems	1993
Gonçalves, J.F., Mendes, J.J.d.M., Resende, M.G.C.	A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. European Journal of Operational Research	2008

Autor	Título del Documento	Año
Hartman & Briskorn	A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem	2010
Hartmann & Kolisch	Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project-scheduling problem	2000
Krüger, Doreen, & Armin Scholl.	A Heuristic Solution Framework for the Resource Constrained (Multi-)Project Scheduling Problem with Sequence-Dependent Transfer Times	2009
Kanagasabapathi, Rajendran & Ananthanarayanan	Scheduling in resource-constrained multiple projects to minimise the weighted tardiness and weighted earliness of projects	2010
Kumanan, S., G. Jegan Jose, and K. Raja.	Multi-Project Scheduling Using an Heuristic and a Genetic Algorithm.	2006
Morillo, Moreno, & Díaz	Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP)	2014
Villafáñez, Félix, Javier Pajares, & Adolfo López	Un Modelo de Programación de Entornos Multi-proyectos Basado En La Metodología de La Cadena Crítica.	2010
Villafáñez, Poza, López-Paredes, Pajares, & Olmo	A generic heuristic for multi-project scheduling problems with global and local resource constraints (RCMPSP)	2018

Fuente: Los autores

5.1.2.3 Ejecución

Durante esta fase se desarrolla el método heurístico de la siguiente manera:

a. Selección de métodos

Como se describió en el numeral 4.2 según la revisión de literatura se han utilizado fundamentalmente dos métodos para la solución del problema RCMPSP: métodos exactos y métodos heurísticos, siendo los métodos heurísticos los más empleados desde finales de los 80's.

Dentro de los métodos heurísticos más utilizados para la solución del RCMPSP, la revisión bibliográfica recomienda utilizar los basados en PR tal como lo citan los siguientes autores:

Browning & Yassine (2010) afirman que las PRs en la búsqueda de solución al RCMPSP son importantes por las siguientes razones:

- El rendimiento mejorado de las metaheurísticas tiene un mayor gasto computacional, lo que significa que las PR son necesarias para problemas muy grandes (Kolisch, 1996);
- Son un componente de otros heurísticos y son indispensables para obtener soluciones iniciales para metaheurísticos. (Hartmann & Kolisch, 2000);
- Son utilizados extensivamente por software de programación de proyectos comerciales debido a su velocidad y simplicidad (Herroelen, 2005).

Por otra parte, Katsavounis (2008) indican que debido a la complejidad de los problemas de RCMPSP, las heurísticas basadas en PR se convierten en la única forma "práctica" de construir un algoritmo factible.

Así mismo, Qingli Hao, et al., (2009) argumentan que la clave para programar la coordinación de múltiples proyectos es detectar conflictos y resolverlos a través de un proceso de toma de decisiones. En general, las opciones de decisión básicas son: "priorizar" (proyectos o tareas), "bloquear" (tareas), "desplazar" (tareas) y "liberar" (restricciones).

Estos son tan solo algunos de los autores que recomiendan el uso de métodos heurísticos basados en PR para la solución del problema RCMPSP, que serán objeto de estudio de la presente investigación.

De acuerdo con lo anterior, se seleccionaron las PRs propuestas por Aristizábal et al., (2017): EDD, FCFS, LALP, LCFS, MAXSLK, MAXTWK, MCS, MINLFT, MINSLK-MINWCS, MINTWK, MOF, MS, SASP, SOF, TWKEST, TWKLST, WAP y WPP y se incluyó la PR RAN y a partir de estas se realizaron todas las posibles combinaciones de 2 y 3 PRs con el fin de comparar el desempeño de las mismas con respecto a los resultados de la Investigación Fase I, y así identificar las mejores.

En **Tabla 2** se presenta una breve descripción de las mismas.

Tabla 2. Reglas de prioridad seleccionadas.

No.	Nombre	SIGLA	BASE / DESCRIPCIÓN	FÓRMULA
1	Primera en llegar primera en terminarse (<i>First Come First Served</i>)	FCFS	Basada en actividad. Se programa primero la actividad que tenga el mínimo comienzo temprano (<i>Early Start</i>).	Min (ES _j l) Donde: ES _j l es el inicio temprano para la actividad j del proyecto l
2	Actividad con la duración más corta primero (<i>Shortest operation first</i>)	SOF	Basada en actividad. Se programa primero la actividad que tenga la mínima duración.	Min (d _j l) Donde: d _j l es la duración de la actividad j del proyecto l
3	Actividad con la duración más larga primero (<i>Maximum operation first</i>)	MOF	Basada en actividad. Se programa primero la actividad que tenga la duración más larga.	Max (d _j l) Donde: d _j l es la duración de la actividad j del proyecto l
4	Holgura mínima (<i>Minimum Slack</i>)	MINSLK	Basada en actividad. Se programa primero la actividad que tenga la holgura mínima.	Min (SLK _j l) Donde: SLK _j l es la holgura de la actividad j del proyecto l SLK _j l = LS _j l – max(ES _j l , t) LS _j l es el inicio tardío para la actividad j del proyecto l t es el periodo actual.
5	Holgura Máxima (<i>Maximum Slack</i>)	MAXSLK	Basada en actividad. Se programa primero la actividad que tenga la holgura máxima.	Max (SLK _j l)
6	Actividad más corta del proyecto más corto (<i>Shortest activity from shortest Project</i>)	SASP	Basada en actividad y proyecto. Se programa primero la actividad que tenga la mínima duración y que pertenezca al proyecto que tenga la mínima duración de ruta crítica sin restricción de recursos.	Min (fil) Donde: Fil = CPI + dil CPI es la ruta crítica del proyecto l (sin restricción de recursos) dij es la duración de la actividad j del proyecto l

No.	Nombre	SIGLA	BASE / DESCRIPCIÓN	FÓRMULA
7	Actividad más larga del proyecto más largo (<i>Longest activity from longest Project</i>)	LALP	Basada en actividad y proyecto. Se programa primero la actividad que tenga la máxima duración y que pertenezca al proyecto que tenga la máxima duración de ruta crítica sin restricción de recursos.	Max (fil)
8	Mínimo contenido de trabajo total (<i>Minimum total Work content</i>)	MINTWK	Basada en actividad y recursos. Se programa primero la actividad con menor contenido de trabajo, el cual se define como la cantidad de recursos que utiliza la actividad j del proyecto l más la cantidad de recursos utilizada por las actividades en trabajo del proyecto l.	Dónde: Así el conjunto de actividades ya programadas (<i>Already Scheduled</i>) del proyecto l, es decir las actividades en trabajo o activas. r es el requerimiento de recursos renovables tipo k para la actividad j del proyecto l La primera parte de la ecuación se conoce como TWK o <i>total work content</i> .
9	Máximo contenido de trabajo total (<i>Maximum total Work content</i>)	MAXTWK	Basada en actividad y recursos. Se programa primero la actividad con mayor contenido de trabajo.	Fórmula
10	Fecha de entrega más temprana (<i>Earliest Due Date</i>)	EDD	Basada en actividad. Se programa primero la actividad con el mínimo comienzo tardío o <i>late start</i> , para la actividad j del proyecto l	Min (LS jl)
11	Última en llegar primera en servirse (<i>Last come first served</i>)	LCFS	Basada en actividad Se programa primero la actividad que tenga el máximo comienzo temprano o <i>early start</i> , para la actividad j del proyecto l	Max (ES jl)

No.	Nombre	SIGLA	BASE / DESCRIPCIÓN	FÓRMULA
12	Mínimo final tardío (<i>Minimum late finish time</i>)	MINLFT	Basada en actividad Se programa primero la actividad que tenga el mínimo final tardío o <i>late finish time</i> para la actividad j del proyecto I	Min (FT jI)
13	Contenido de trabajo total y tiempo de inicio tardío (MAXTWK & <i>Earliest Late Start Time</i>)	TWK-LST	Basada en actividad y recursos. Se programa primero la actividad con máximo contenido de trabajo total tal como en la regla 9 y en caso de empate se escoge la actividad con mínimo tiempo de inicio tardío.	Primero: MAXTWK Luego: Min (LS jI)
14	Contenido de trabajo total y tiempo de inicio temprano (MAXTWK & <i>Earliest early Start Time</i>)	TWK-EST	Basada en actividad y recursos. Se programa primero la actividad con máximo contenido de trabajo total tal como en la regla 9 y en caso de empate se escoge la actividad con mínimo tiempo de inicio temprano.	Primero: MAXTWK Luego: Min (ES jI)
15	Máximo total de sucesoras (<i>Maximum total Sucesora</i>)	MS	Basada en actividad Se programa primero las actividades que tengan mayor número de sucesoras	Max (TS jI) Donde: TS es el total de actividades sucesoras de la jI actividad j del proyecto I
16	Máximo total de sucesores críticos (<i>Maximum critical sucesors</i>)	MCS	Basada en actividad Se programa primero las actividades que tengan mayor número de sucesoras críticas (holgura 0)	Max (CS jI) Donde: CSjI es el total de actividades sucesoras críticas de la actividad j del proyecto I

No.	Nombre	SIGLA	BASE / DESCRIPCIÓN	FÓRMULA
17	Prioridad dada por el usuario 1: prioridad por importancia de actividad (<i>Weight Activity Priority</i>)	WAP	Basada prioridad de usuario El usuario puede dar prioridad a las actividades y luego se programa primero las actividades con mayor prioridad	N/A
18	Prioridad dada por el usuario 2: prioridad por importancia de proyecto. (<i>Weight Project Priority</i>)	WPP	Basada prioridad de usuario El usuario puede dar prioridad a los proyectos y luego se programa primero las actividades que pertenezcan al proyecto de mayor prioridad	N/A
19	Aleatorio (<i>Random</i>)	RAN	Se seleccionan aleatoriamente las actividades. Esta regla solo se utilizó como criterio de desempate	N/A

Fuente: (Aristizábal, Castellanos & Ordóñez, 2017)

b. Selección de medidas de desempeño

Con el objetivo de evidenciar los resultados de la optimización de las programaciones en los multi-proyectos, los Gerentes de Proyecto se ven enfrentados a preguntas tales como: ¿Cuál será la mejor alternativa de asignación de recursos para minimizar el retraso promedio del proyecto? o ¿Cuál para garantizar que el tiempo total de duración sea el mínimo?, para lo que se utilizan las PR. En este trabajo de grado se estudiarán las nuevas PRs creadas a partir de la combinación doble y triple de las mismas, de igual manera se evaluará su desempeño por medio de la definición de una función objetivo que minimice: la duración total y utilización de recursos del portafolio.

Según Aristizábal, et al., (2017) las medidas de desempeño para evaluar su efectividad son: *Makespan* (tiempo total del multi-proyectos), *Mean flowtime* (tiempo promedio), *Maximum Lateness* (máxima tardanza), *Mean lateness* (retraso promedio), *Tardiness* (Tardanza), *Maximum tardiness* (máxima tardanza) *Mean tardiness* (Tardanza promedio), *Number of tardy projects* (número de proyectos atrasados), *Number of tardy jobs*: (número de actividades atrasadas).

Los gerentes de multi-proyectos con recursos limitados se enfrentan a decisiones difíciles en cómo asignar recursos para minimizar el retraso promedio por proyecto o el tiempo para completar todo el conjunto de proyectos.

Para evaluar el desempeño de cada método heurístico o regla de prioridad, se hace necesario tener una función objetivo, enfocada a minimizar la duración total del multi-proyectos. Aristizábal et al., (2017) evaluaron las medidas de desempeño para las 18 PRs de manera individual, en esta investigación se evaluarán dichas medidas para 19 PRs y todas las combinaciones posibles de 2 y 3 reglas. En la **Tabla 3** se describen las medidas de desempeño seleccionadas.

Tabla 3. Medidas de desempeño seleccionadas

MEDIDA DE DESEMPEÑO	FÓRMULA	DESCRIPCIÓN
Tc <i>Tiempo computacional</i>	N/A	Total de tiempo consumido por el <i>software</i> en resolver la instancia
C <i>Program Makespan</i>	$\text{Max}(FT_{1,1}, \dots, FT_{J,L})$	Esta función mide el tiempo de duración total o finalización de todas las actividades del programa.
F <i>Program mean flow time</i>	<i>Flow time para las actividades:</i> $Fwt_{j,l} = FT_{j,l} - r_{j,l}$ <i>Mean flow time para el programa:</i> $\frac{1}{n} \sum_{l=1}^L Fwt$	Mide el tiempo promedio de respuesta de los recursos para atender las actividades desde que se liberan (r_j) para ser procesadas hasta que son terminadas (FT_j).
L <i>Program maximum lateness</i>	Lateness de la actividad: $L_{j,l} = FT_{j,l} - d_{j,l}$ Máximo lateness $\text{Max} \{L_{1,1}, \dots, L_{J,L}\}$	Representa el máximo retraso de una actividad dentro del multi-proyectos y busca minimizar este retraso máximo.
L <i>Program mean lateness</i>	$\frac{1}{n} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J FT_{jl} - d_{jl}$	Representa el retraso promedio de las actividades del multi-proyectos.
T <i>Program total tardiness</i>	Tardiness de la actividad: $T_{j,l} = \text{max} \{ FT_{j,l} - d_{j,l}$	Representa el retraso total del multi-proyectos, es una medida del lateness y solo opera para valores positivos.

MEDIDA DE DESEMPEÑO	FÓRMULA	DESCRIPCIÓN
	$\{0\}$ Total tardines multi-proyectos: $\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J T_{jl}$	
mT <i>Program maximum tardiness</i>	$\text{Max } \{T_{1,1}, \dots, T_{J,L}\}$	Representa el máximo retraso de una actividad dentro del multi-proyectos y busca minimizar este retraso máximo.
T <i>Program mean tardiness</i>	$\frac{1}{nt} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J T_{jl}$	Representa el retraso medio de todo el multi-proyectos, para su cálculo divide la tardanza total entre el número de actividades tardías.
NL <i>Program number of tardy projects</i>	N/A	Representa la cantidad de proyectos que están terminando tarde dentro del multi-proyectos.
NJ <i>Program number of tardy jobs</i>	N/A	Representa la cantidad de actividades que están terminando tarde dentro del multi-proyectos.

Fuente: Aristizábal, Castellanos & Ordóñez (2017)

c. Instancias

Según Browning & Yassine (2009), las instancias son multi-redes de programación teóricas generadas para probar métodos de solución a los problemas RCPS P o RCMPSP. A continuación se describen los principales generadores encontrados en la revisión de literatura.

Generador de Instancias

Kolisch & Padman (2001) afirman que se han creado varios generadores de instancias y que solo unos pocos han sido puestos a disposición del público. El primero fue el desarrollado por Demeulemeester et al., (1992), el cual se centró en la generación de redes AOA fuertemente aleatorias para una cantidad determinada de arcos y nodos.

Posteriormente, Kolisch et al., (1995) propusieron un generador de instancias de tamaño completo, llamado *ProGen*, para toda clase de problemas de programación de proyectos. Este programa incluye varias funciones objetivo, actividades únicas y multimodo,

diferentes categorías de recursos y problemas de programación de multi-proyectos y simple. *ProGen* permite generar instancias de acuerdo con un diseño factorial completo de una amplia gama de parámetros de problemas bien definidos.

Kolisch et al., (1998) indica que *ProGen* cuenta con un nuevo parámetro del problema, denominado fuerza del recurso (*Resource strength*), el cual mide la disponibilidad de un recurso específico como una combinación de un límite inferior y un límite superior de la disponibilidad de recursos. El *resource strength* puede ser aplicado a diferentes categorías y tipos de recursos.

Schwindt (1995) extendió *ProGen* a *ProGen/max* para incorporar retardos mínimos y máximos de tiempo y posteriormente el factor de holgura de los proyectos realizado por Thesen (1997). Drexler et al., (1997) extendieron *ProGen* a *ProGen/πx* para incorporar nuevas extensiones al modelo, tales como recursos parcialmente renovables, tiempos de cambio, identidad de modo y conjunto de identidades de modo.

Kolisch & Padman (2001) afirman que otros generadores han sido desarrollados por Agrawal et al., (1996) y Demeulemeester et al.. (1993). Demeulemeester et al.. (1993) propusieron un generador de actividades aleatorias en redes para un número dado de arcos y nodos. Agrawal et al., (1996) propusieron un generador de instancias para redes AOA que emplea el parámetro denominado índice de complejidad (CI en inglés), el cual fue introducido por Bein et al., (1992). El CI mide hasta qué punto la complejidad de la red es en serie o en paralelo.

Finalmente, Kolisch & Padman (2001) indican que Tavares (1999) presentó un nuevo generador para crear grandes redes de proyectos AON con respecto a diferentes parámetros morfológicos, los cuales pueden agruparse en tres aspectos: 1) El primer aspecto indica la forma gráfica de la red, la cual tiene en cuenta el indicador de tamaño, expresado en términos del número de actividades de la red, junto con el indicador de longitud, que especifica que tan serial o paralela es la red, representado en términos del número de pasos jerárquicos y el número de actividades, 2) El segundo aspecto indica la complejidad de la red y está representada en términos del número de flechas de longitud, entre los diferentes niveles jerárquicos de la red y el número de actividades de esta y 3) el tercer aspecto indica la cantidad de niveles flotantes o cantidad de flechas de diferentes longitudes que presenta la red hasta llegar al último nivel jerárquico.

Estas perspectivas son descritas para redes de proyectos y en el presente trabajo es especialmente importante la segunda ya que la complejidad de las redes juega un papel importante en la solución de los dos tipos de problemas RCPS y RCMPSP.

Biblioteca de programación de proyectos

Zuloaga (2017) indica que existe una biblioteca de problemas de programación de proyectos que se propuso por primera vez en Kolisch & Sprecher (1996). Actualmente, esta biblioteca contiene los últimos conjuntos de referencia para RCPSP y RCMPSP y comprende nuevos problemas del tipo RCPSP/max, RCMPSP/max, RIP/max y RLP/max. La información contenida en la biblioteca se puede clasificar en tres categorías: La primera corresponde a la información general, que incluye el alcance de la biblioteca y su desarrollo que se ofrece en Kolisch & Sprecher (1996), la segunda corresponde a instancias de referencia, y la tercera al acceso a generadores de instancias. La biblioteca se puede consultar en la siguiente dirección: <http://mpsplib.com/>.

Finalmente, Zuloaga (2017) indica que existe otra biblioteca en la red llamada *Project Scheduling Problem Library* (PSPLIB), la cual contiene diversos conjuntos de datos para varios tipos de problemas de programación de proyectos con recursos limitados, junto con las mejores soluciones encontradas para cada instancia. Sin embargo, el problema de PSPLIB es que contiene numerosos ejemplos para proyectos individuales. Las instancias de la PSPLIB están disponibles en el sitio web público: <http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/>.

Selección de las instancias

Según la metodología propuesta por Aristizábal et al., (2017), se escogieron 14 instancias las cuales se detallan en la Tabla 4, dados los siguientes parámetros:

- Nombre de la instancia: es el número que le da la librería a cada una de las instancias del estudio.
- Proyectos: número de proyectos que contiene cada instancia.
- Recursos: número de recursos globales por multi-proyectos.
- Actividades: número de actividades por proyecto.

Tabla 4. Características de las instancias

Ítem	Nombre de la Instancia	Proyectos	Recursos	Actividades
1	3	10	2	32
2	12	20	1	32
3	24	10	3	92
4	34	20	3	92
5	38	5	2	92

Ítem	Nombre de la Instancia	Proyectos	Recursos	Actividades
6	45	10	1	122
7	49	2	3	122
8	53	20	2	122
9	57	5	1	122
10	59	5	3	122
11	99	5	4	92
12	108	10	4	122
13	113	20	4	122
14	128	2	4	122

Fuente: Los autores

d. Combinaciones de dos (2) y tres (3) reglas de prioridad (PR)

- **Instrumento para la investigación**

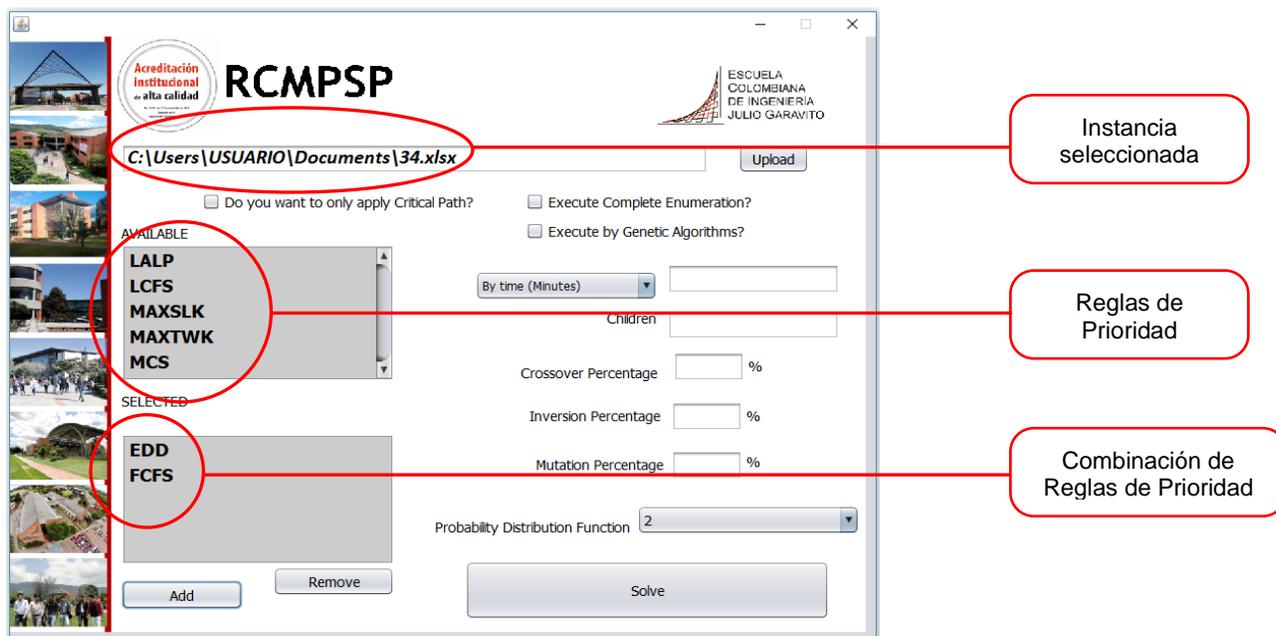
Según Aristizábal et al., (2017) para la medición del desempeño de los diferentes métodos heurísticos basados en PR, fue necesario programar un *software* capaz de ajustarse a los requerimientos de la investigación. El *software* está programado en JAVA, un lenguaje de programación de propósito general y uno de los más conocidos y usados a nivel mundial.

El lenguaje se basa en el paradigma de programación orientado a objetos (POO) para lograr representar las unidades de trabajo: las actividades, los proyectos y los recursos como objetos, pues se manipulan sus datos de entrada (*input*) para lograr los datos de salida programados (*output*).

El *software* genera un archivo de hoja de cálculo de Microsoft Excel en la ubicación brindada por el usuario, en donde se presenta la información de los cálculos realizados ordenados en diferentes hojas en el archivo.

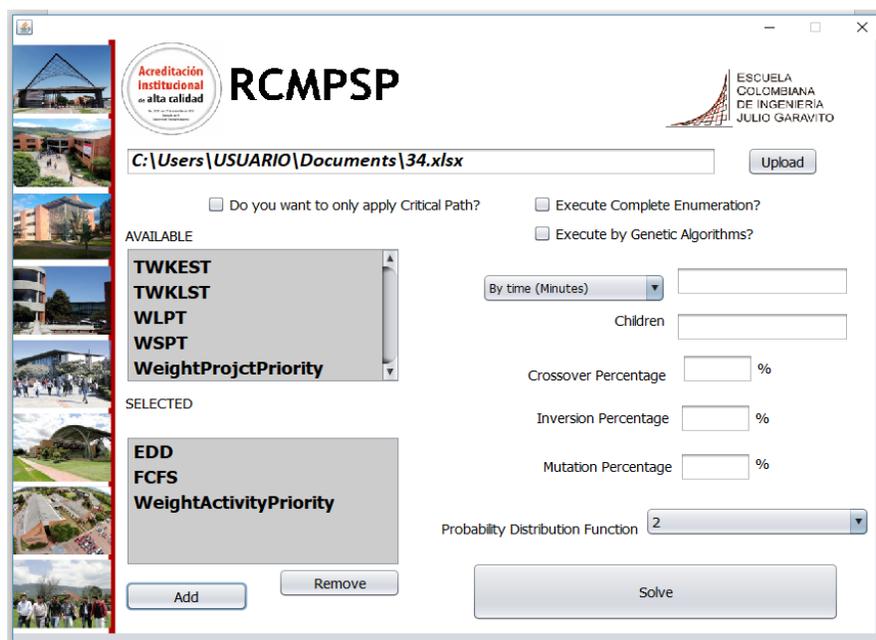
Este *software* desarrollado como producto en la investigación de Aristizábal et al., (2017), se utilizó en el presente estudio para realizar las combinaciones de dos y tres PR tal como se observa en la **Ilustración 11** e **Ilustración 12**. En primer lugar se carga el archivo de entrada que contiene la instancia, luego se eligen las reglas de prioridad a probar y se ejecuta.

Ilustración 11. Ejemplo de combinación de dos reglas de prioridad (EDD FCFS) para la instancia 34



Fuente: Aristizábal, Castellanos & Ordóñez (2017)

Ilustración 12. Ejemplo de combinación de tres reglas de prioridad (EDD FCF WAP) para la instancia 34



Fuente: Aristizábal, Castellanos & Ordóñez (2017)

El algoritmo desarrollado por Aristizábal et al., (2017) para este *software* es el siguiente:

Pseudocódigo general del software

/* Evalua el multi proyecto a partir de la lista de proyectos creados por el archivo excel adjuntado por el usuario */

ALGORITMO: MainTerator.

ALGORITMO: MainTerator.

ENTRADA:

Lista de actividades -> evaluador

Lista de recursos globales disponibles -> recursosDisponibles

SALIDA: Archivo en excel con la salida a partir de la evaluación del multi proyecto.

VARIABLES:

visitados = {} #Lista de actividades que ya fueron realizadas
critica -> #Instancia de la clase Ruta_Critica que permite evaluar la ruta critica de una lista de actividades y obtener las actividades que no tiene predecesores

desarrollo = {} #Lista de actividades que estan desarrollándose

actividadesIniciales = {} #Actividades iniciales que van a ir agregando las actividades que pueden ir desarrollandose una vez realizado todos sus predecesores

posiblesActividades = {} #Lista con las posibles actividades que se pueden desarrollar teniendo en cuenta las siguientes restricciones:

1. Orden de precedencia
2. Disponibilidad de recursos

periodoActual = 0 #Contador para llevar la cuenta sobre el periodo que va transcurriendo en el iterador

reglasDePrioridad #Lista de reglas de prioridad seleccionadas por el usuario en orden de izquierda a derecha

METODOS:

LONGITUD(lista) #Retorna la cantidad de elementos que tiene una lista

AGREGAR_ACTIVIDAD (lista, actividad) #Agrega la actividad a la lista mencionada

INSTANCIAR_LISTA(Nombre_Lista) #Se crea la lista con el nombre especificado en el metodo

VACIAR(lista) #Elimina todos los elementos de la lista

RECURSOS_DISPONIBLES(actividad) #Retorna verdadero si hay recursos para poder realizar dicha actividad, de lo contrario retorna false

ACTUALIZAR_DATOS (actividad, periodoActual) #Actualiza el atributo ES (EarlyStart) con el valor de periodoActual y el atributo EF (EarlyFinish)

regla_Prioridad.EMPATE(possiblesActividades) #Retorna verdadero si hay empate con las actividades posibles a partir de la regla de prioridad que se está evaluando

regla_Prioridad.SELECCIONACTIVIDAD() #Retorna la actividad seleccionada por la regla de prioridad

actividadSeleccionada.OBTENER_RECURSOS () #Genera una lista de recursos que utiliza la actividad para desarrollarse

INICIO:

evaluador = Ordenamiento_Topologico(evaluador)
critica = Ruta_Critica(evaluador)

actividadesIniciales = critica. obtenerActividadesIniciales ()
visitados = {}

MIENTRAS (LONGITUD(visitados) < LONGITUD(evaluador)):

 PARA CADA actividad EN desarrollo:

 SI actividad. EarlyFinish <= periodoActual:

 devolverRecursos (actividad, recursosDisponibles)

 PARA CADA actividad_Sucesora DE actividad:

 SI todos_predecesores_actividad_sucesora

ESTAN EN visitados:

 AGREGAR_ACTIVIDAD (actividadesIniciales, actividad_Sucesora)

 FIN_SI

 FIN_PARA

 FIN_SI

 FIN_PARA

INSTANCIAR_LISTA(posiblesActividades)

MIENTRAS QUE LONGITUD(posiblesActividades):
VACIAR(posiblesActividades)
PARA CADA actividad EN actividadesIniciales:
SI RECURSOS_DISPONIBLES(actividad):

AGREGAR_ACTIVIDAD (posiblesActividades, actividad)
FIN_SI
ACTUALIZAR_DATOS(actividad)

FIN_PARA
SI LONGITUD(posiblesActividades)>0:
PARA regla_Prioridad EN reglasDePrioridad:
SI

!(regla_Prioridad.EMPATE(posiblesActividades)):
actividadSeleccionada =

regla_Prioridad.SELECCIONACTIVIDAD()

AGREGAR_ACTIVIDAD (desarrollo, actividadSeleccionada)
PARA CADA recurso EN
actividadSeleccionada.OBTENER_RECURSOS ():

ACTUALIZAR_RECURSO (recurso, recursosDisponibles)
FIN_PARA
FIN_SI
FIN_PARA
FIN_SI
FIN_MIENTRAS
periodoActual+=1
FIN MIENTRAS
FINAL

- **Combinaciones**

En la **Tabla 2** y en la **Tabla 4** se mostraron las 19 PRs y las 14 instancias seleccionadas respectivamente. A partir de éstas se realizaron las combinaciones de 2 y 3 PRs de acuerdo con la Ecuación Combinación con orden (permutación) y sin repetición (9).

$$P_k^n = \frac{n!}{(n - k)!} \quad (9)$$

Fuente: (Montgomery & Runger, 1996)

Donde:

n: es el número de reglas de prioridad
k: es el número de combinaciones

Combinaciones de 2 reglas de prioridad

Para las 19 PRs se realizaron todas las posibles combinaciones dobles con orden y sin repetición para las 14 instancias, a partir de la Ecuación (9):

$$P_2^{19} = \frac{19!}{(19 - 2)!}$$
$$P_2^{19} = \frac{19!}{17!} = 342$$

En la Tabla 5 se muestran las 342 posibles combinaciones para la instancia 34.

Tabla 5. Total combinaciones dobles para la instancia 34

ÍTEM	INSTANCIA	REGLA	EDD	FCFS	LALP	LCFS	MAXSLK	MAXTWK	MCS	MINLFT	MINSLK-MINWCS	MINTWK	MOF	MS	RAN	SASP	SOF	TWKEST	TWKLST	WAP	WPP
1	34	EDD		34 FCFS EDD	34 LALP EDD	34 LCFS EDD	34 MAXSLK EDD	34 MAXTWK EDD	34 MCS EDD	34 MINLFT EDD	34 MINSLK-MINWCS EDD	34 MINTWK EDD	34 MOF EDD	34 MS EDD	34 RAN EDD	34 SASP EDD	34 SOF EDD	34 TWKEST EDD	34 TWKLST EDD	34 WAP EDD	34 WPP EDD
2		FCFS	34 EDD FCFS		34 LALP FCFS	34 LCFS FCFS	34 MAXSLK FCFS	34 MAXTWK FCFS	34 MCS FCFS	34 MINLFT FCFS	34 MINSLK-MINWCS FCFS	34 MINTWK FCFS	34 MOF FCFS	34 MS FCFS	34 RAN FCFS	34 SASP FCFS	34 SOF FCFS	34 TWKEST FCFS	34 TWKLST FCFS	34 WAP FCFS	34 WPP FCFS
3		LALP	34 EDD LALP	34 FCFS LALP		34 LCFS LALP	34 MAXSLK LALP	34 MAXTWK LALP	34 MCS LALP	34 MINLFT LALP	34 MINSLK-MINWCS LALP	34 MINTWK LALP	34 MOF LALP	34 MS LALP	34 RAN LALP	34 SASP LALP	34 SOF LALP	34 TWKEST LALP	34 TWKLST LALP	34 WAP LALP	34 WPP LALP
4		LCFS	34 EDD LCFS	34 FCFS LCFS	34 LALP LCFS		34 MAXSLK LCFS	34 MAXTWK LCFS	34 MCS LCFS	34 MINLFT LCFS	34 MINSLK-MINWCS LCFS	34 MINTWK LCFS	34 MOF LCFS	34 MS LCFS	34 RAN LCFS	34 SASP LCFS	34 SOF LCFS	34 TWKEST LCFS	34 TWKLST LCFS	34 WAP LCFS	34 WPP LCFS
5		MAXSLK	34 EDD MAXSLK	34 FCFS MAXSLK	34 LALP MAXSLK	34 LCFS MAXSLK		34 MAXTWK MAXSLK	34 MCS MAXSLK	34 MINLFT MAXSLK	34 MINSLK-MINWCS MAXSLK	34 MINTWK MAXSLK	34 MOF MAXSLK	34 MS MAXSLK	34 RAN MAXSLK	34 SASP MAXSLK	34 SOF MAXSLK	34 TWKEST MAXSLK	34 TWKLST MAXSLK	34 WAP MAXSLK	34 WPP MAXSLK
6		MAXTWK	34 EDD MAXTWK	34 FCFS MAXTWK	34 LALP MAXTWK	34 LCFS MAXTWK	34 MAXSLK MAXTWK		34 MCS MAXTWK	34 MINLFT MAXTWK	34 MINSLK-MINWCS MAXTWK	34 MINTWK MAXTWK	34 MOF MAXTWK	34 MS MAXTWK	34 RAN MAXTWK	34 SASP MAXTWK	34 SOF MAXTWK	34 TWKEST MAXTWK	34 TWKLST MAXTWK	34 WAP MAXTWK	34 WPP MAXTWK
7		MCS	34 EDD MCS	34 FCFS MCS	34 LALP MCS	34 LCFS MCS	34 MAXSLK MCS	34 MAXTWK MCS		34 MINLFT MCS	34 MINSLK-MINWCS MCS	34 MINTWK MCS	34 MOF MCS	34 MS MCS	34 RAN MCS	34 SASP MCS	34 SOF MCS	34 TWKEST MCS	34 TWKLST MCS	34 WAP MCS	34 WPP MCS
8		MINLFT	34 EDD MINLFT	34 FCFS MINLFT	34 LALP MINLFT	34 LCFS MINLFT	34 MAXSLK MINLFT	34 MAXTWK MINLFT	34 MCS MINLFT		34 MINSLK-MINWCS MINLFT	34 MINTWK MINLFT	34 MOF MINLFT	34 MS MINLFT	34 RAN MINLFT	34 SASP MINLFT	34 SOF MINLFT	34 TWKEST MINLFT	34 TWKLST MINLFT	34 WAP MINLFT	34 WPP MINLFT
9		MINSLK-MINWCS	34 EDD MINSLK-MINWCS	34 FCFS MINSLK-MINWCS	34 LALP MINSLK-MINWCS	34 LCFS MINSLK-MINWCS	34 MAXSLK MINSLK-MINWCS	34 MAXTWK MINSLK-MINWCS	34 MCS MINSLK-MINWCS	34 MINLFT MINSLK-MINWCS		34 MINTWK MINSLK-MINWCS	34 MOF MINSLK-MINWCS	34 MS MINSLK-MINWCS	34 RAN MINSLK-MINWCS	34 SASP MINSLK-MINWCS	34 SOF MINSLK-MINWCS	34 TWKEST MINSLK-MINWCS	34 TWKLST MINSLK-MINWCS	34 WAP MINSLK-MINWCS	34 WPP MINSLK-MINWCS
10		MINTWK	34 EDD MINTWK	34 FCFS MINTWK	34 LALP MINTWK	34 LCFS MINTWK	34 MAXSLK MINTWK	34 MAXTWK MINTWK	34 MCS MINTWK	34 MINLFT MINTWK	34 MINSLK-MINWCS MINTWK		34 MOF MINTWK	34 MS MINTWK	34 RAN MINTWK	34 SASP MINTWK	34 SOF MINTWK	34 TWKEST MINTWK	34 TWKLST MINTWK	34 WAP MINTWK	34 WPP MINTWK
11		MOF	34 EDD MOF	34 FCFS MOF	34 LALP MOF	34 LCFS MOF	34 MAXSLK MOF	34 MAXTWK MOF	34 MCS MOF	34 MINLFT MOF	34 MINSLK-MINWCS MOF	34 MINTWK MOF		34 MS MOF	34 RAN MOF	34 SASP MOF	34 SOF MOF	34 TWKEST MOF	34 TWKLST MOF	34 WAP MOF	34 WPP MOF
12		MS	34 EDD MS	34 FCFS MS	34 LALP MS	34 LCFS MS	34 MAXSLK MS	34 MAXTWK MS	34 MCS MS	34 MINLFT MS	34 MINSLK-MINWCS MS	34 MINTWK MS	34 MOF MS		34 RAN MS	34 SASP MS	34 SOF MS	34 TWKEST MS	34 TWKLST MS	34 WAP MS	34 WPP MS

Continuación Tabla 5.

ÍTEM	INSTANCIA	REGLA	EDD	FCFS	LALP	LCFS	MAXSLK	MAXTWK	MCS	MINLFT	MINSLK-MINWCS	MINTWK	MOF	MS	RAN	SASP	SOF	TWKEST	TWKLST	WAP	WPP	
13	34	RAN	34 EDD RAN	34 FCFS RAN	34 LALP RAN	34 LCFS RAN	34 MAXSLK RAN	34 MAXTWK RAN	34 MCS RAN	34 MINLFT RAN	34 MINSLK-MINWCS RAN	34 MINTWK RAN	34 MOF RAN	34 MS RAN		34 SASP RAN	34 SOF RAN	34 TWKEST RAN	34 TWKLST RAN	34 WAP RAN	34 WPP RAN	
14		SASP	34 EDD SASP	34 FCFS SASP	34 LALP SASP	34 LCFS SASP	34 MAXSLK SASP	34 MAXTWK SASP	34 MCS SASP	34 MINLFT SASP	34 MINSLK-MINWCS SASP	34 MINTWK SASP	34 MOF SASP	34 MS SASP	34 RAN SASP		34 SOF SASP	34 TWKEST SASP	34 TWKLST SASP	34 WAP SASP	34 WPP SASP	
15		SOF	34 EDD SOF	34 FCFS SOF	34 LALP SOF	34 LCFS SOF	34 MAXSLK SOF	34 MAXTWK SOF	34 MCS SOF	34 MINLFT SOF	34 MINSLK-MINWCS SOF	34 MINTWK SOF	34 MOF SOF	34 MS SOF	34 RAN SOF	34 SASP SOF		34 TWKEST SOF	34 TWKLST SOF	34 WAP SOF	34 WPP SOF	
16		TWKEST	34 EDD TWKEST	34 FCFS TWKEST	34 LALP TWKEST	34 LCFS TWKEST	34 MAXSLK TWKEST	34 MAXTWK TWKEST	34 MCS TWKEST	34 MINLFT TWKEST	34 MINSLK-MINWCS TWKEST	34 MINTWK TWKEST	34 MOF TWKEST	34 MS TWKEST	34 RAN TWKEST	34 SASP TWKEST	34 SOF TWKEST		34 TWKEST TWKEST	34 TWKLST TWKEST	34 WAP TWKEST	34 WPP TWKEST
17		TWKLST	34 EDD TWKLST	34 FCFS TWKLST	34 LALP TWKLST	34 LCFS TWKLST	34 MAXSLK TWKLST	34 MAXTWK TWKLST	34 MCS TWKLST	34 MINLFT TWKLST	34 MINSLK-MINWCS TWKLST	34 MINTWK TWKLST	34 MOF TWKLST	34 MS TWKLST	34 RAN TWKLST	34 SASP TWKLST	34 SOF TWKLST	34 TWKEST TWKLST		34 TWKLST TWKLST	34 WAP TWKLST	34 WPP TWKLST
18		WAP	34 EDD WAP	34 FCFS WAP	34 LALP WAP	34 LCFS WAP	34 MAXSLK WAP	34 MAXTWK WAP	34 MCS WAP	34 MINLFT WAP	34 MINSLK-MINWCS WAP	34 MINTWK WAP	34 MOF WAP	34 MS WAP	34 RAN WAP	34 SASP WAP	34 SOF WAP	34 TWKEST WAP	34 TWKLST WAP		34 WPP WAP	
19		WPP	34 EDD WPP	34 FCFS WPP	34 LALP WPP	34 LCFS WPP	34 MAXSLK WPP	34 MAXTWK WPP	34 MCS WPP	34 MINLFT WPP	34 MINSLK-MINWCS WPP	34 MINTWK WPP	34 MOF WPP	34 MS WPP	34 RAN WPP	34 SASP WPP	34 SOF WPP	34 TWKEST WPP	34 TWKLST WPP	34 WAP WPP		

Fuente: Los autores

Se realizó el mismo procedimiento para cada una de las instancias donde se obtuvo un total de **4.788** combinaciones ($14 \times 342 = 4.788$). Una vez conocidas las combinaciones se utilizó el software para obtener los resultados de las medidas de desempeño.

Combinaciones de 3 reglas de prioridad (PR)

Para las 19 PR se realizaron todas las posibles combinaciones triples con orden y sin repetición para las 14 instancias, a partir de la Ecuación (9):

$$P = \frac{19!}{(19 - 3)!}$$

$$P_3^{19} = \frac{19!}{16!} = 5.814$$

En la Tabla 6 se observan las combinaciones triples posibles para una regla de prioridad (EDD) para la instancia 34 en total 306 combinaciones.

Tabla 6. Total combinaciones triples para la regla de prioridad EDD de la instancia 34

ÍTEM	INSTANCIA	REGLA	FCFS	LALP	LCFS	MAXSLK	MAXTWK	MCS	MINLFT	MINSLK-MINWCS	MINTWK	MOF	MS	SASP	SOF	TWKEST	TWKLST	RAN	WAP	WPP
1	34	EDD																		
2		FCFS		34 EDD LALP FCFS	34 EDD LCFS FCFS	34 EDD MAXSLK FCFS	34 EDD MAXTWK FCFS	34 EDD MCS FCFS	34 EDD MINLFT FCFS	34 EDD MINSLK- MINWCS FCFS	34 EDD MINTWK FCFS	34 EDD MOF FCFS	34 EDD MS FCFS	34 EDD SASP FCFS	34 EDD SOF FCFS	34 EDD TWKEST FCFS	34 EDD TWKLST FCFS	34 EDD RAN FCFS	34 EDD WAP FCFS	34 EDD WPP FCFS
3		LALP	34 EDD FCFS LALP		34 EDD LCFS LALP	34 EDD MAXSLK LALP	34 EDD MAXTWK LALP	34 EDD MCS LALP	34 EDD MINLFT LALP	34 EDD MINSLK- MINWCS LALP	34 EDD MINTWK LALP	34 EDD MOF LALP	34 EDD MS LALP	34 EDD SASP LALP	34 EDD SOF LALP	34 EDD TWKEST LALP	34 EDD TWKLST LALP	34 EDD RAN LALP	34 EDD WAP LALP	34 EDD WPP LALP
4		LCFS	34 EDD FCFS LCFS	34 EDD LALP LCFS		34 EDD MAXSLK LCFS	34 EDD MAXTWK LCFS	34 EDD MCS LCFS	34 EDD MINLFT LCFS	34 EDD MINSLK- MINWCS LCFS	34 EDD MINTWK LCFS	34 EDD MOF LCFS	34 EDD MS LCFS	34 EDD SASP LCFS	34 EDD SOF LCFS	34 EDD TWKEST LCFS	34 EDD TWKLST LCFS	34 EDD RAN LCFS	34 EDD WAP LCFS	34 EDD WPP LCFS
5		MAXSLK	34 EDD FCFS MAXSLK	34 EDD LALP MAXSLK	34 EDD LCFS MAXSLK		34 EDD MAXTWK MAXSLK	34 EDD MCS MAXSLK	34 EDD MINLFT MAXSLK	34 EDD MINSLK- MINWCS MAXSLK	34 EDD MINTWK MAXSLK	34 EDD MOF MAXSLK	34 EDD MS MAXSLK	34 EDD SASP MAXSLK	34 EDD SOF MAXSLK	34 EDD TWKEST MAXSLK	34 EDD TWKLST MAXSLK	34 EDD RAN MAXSLK	34 EDD WAP MAXSLK	34 EDD WPP MAXSLK
6		MAXTWK	34 EDD FCFS MAXTWK	34 EDD LALP MAXTWK	34 EDD LCFS MAXTWK	34 EDD MAXSLK MAXTWK		34 EDD MCS MAXTWK	34 EDD MINLFT MAXTWK	34 EDD MINSLK- MINWCS MAXTWK	34 EDD MINTWK MAXTWK	34 EDD MOF MAXTWK	34 EDD MS MAXTWK	34 EDD SASP MAXTWK	34 EDD SOF MAXTWK	34 EDD TWKEST MAXTWK	34 EDD TWKLST MAXTWK	34 EDD RAN MAXTWK	34 EDD WAP MAXTWK	34 EDD WPP MAXTWK
7		MCS	34 EDD FCFS MCS	34 EDD LALP MCS	34 EDD LCFS MCS	34 EDD MAXSLK MCS	34 EDD MAXTWK MCS		34 EDD MINLFT MCS	34 EDD MINSLK- MINWCS MCS	34 EDD MINTWK MCS	34 EDD MOF MCS	34 EDD MS MCS	34 EDD SASP MCS	34 EDD SOF MCS	34 EDD TWKEST MCS	34 EDD TWKLST MCS	34 EDD RAN MCS	34 EDD WAP MCS	34 EDD WPP MCS
8		MINLFT	34 EDD FCFS MINLFT	34 EDD LALP MINLFT	34 EDD LCFS MINLFT	34 EDD MAXSLK MINLFT	34 EDD MAXTWK MINLFT	34 EDD MCS MINLFT		34 EDD MINSLK- MINWCS MINLFT	34 EDD MINTWK MINLFT	34 EDD MOF MINLFT	34 EDD MS MINLFT	34 EDD SASP MINLFT	34 EDD SOF MINLFT	34 EDD TWKEST MINLFT	34 EDD TWKLST MINLFT	34 EDD RAN MINLFT	34 EDD WAP MINLFT	34 EDD WPP MINLFT
9		MINSLK-MINWCS	34 EDD FCFS MINSLK- MINWCS	34 EDD LALP MINSLK- MINWCS	34 EDD LCFS MINSLK- MINWCS	34 EDD MAXSLK MINSLK- MINWCS	34 EDD MAXTWK MINSLK- MINWCS	34 EDD MCS MINSLK- MINWCS	34 EDD MINLFT MINSLK- MINWCS		34 EDD MINTWK MINSLK- MINWCS	34 EDD MOF MINSLK- MINWCS	34 EDD MS MINSLK- MINWCS	34 EDD SASP MINSLK- MINWCS	34 EDD SOF MINSLK- MINWCS	34 EDD TWKEST MINSLK- MINWCS	34 EDD TWKLST MINSLK- MINWCS	34 EDD RAN MINSLK- MINWCS	34 EDD WAP MINSLK- MINWCS	34 EDD WPP MINSLK- MINWCS
10		MINTWK	34 EDD FCFS MINTWK	34 EDD LALP MINTWK	34 EDD LCFS MINTWK	34 EDD MAXSLK MINTWK	34 EDD MAXTWK MINTWK	34 EDD MCS MINTWK	34 EDD MINLFT MINTWK	34 EDD MINSLK- MINWCS MINTWK		34 EDD MOF MINTWK	34 EDD MS MINTWK	34 EDD SASP MINTWK	34 EDD SOF MINTWK	34 EDD TWKEST MINTWK	34 EDD TWKLST MINTWK	34 EDD RAN MINTWK	34 EDD WAP MINTWK	34 EDD WPP MINTWK
11		MOF	34 EDD FCFS MOF	34 EDD LALP MOF	34 EDD LCFS MOF	34 EDD MAXSLK MOF	34 EDD MAXTWK MOF	34 EDD MCS MOF	34 EDD MINLFT MOF	34 EDD MINSLK- MINWCS MOF	34 EDD MINTWK MOF		34 EDD MS MOF	34 EDD SASP MOF	34 EDD SOF MOF	34 EDD TWKEST MOF	34 EDD TWKLST MOF	34 EDD RAN MOF	34 EDD WAP MOF	34 EDD WPP MOF
12		MS	34 EDD FCFS MS	34 EDD LALP MS	34 EDD LCFS MS	34 EDD MAXSLK MS	34 EDD MAXTWK MS	34 EDD MCS MS	34 EDD MINLFT MS	34 EDD MINSLK- MINWCS MS	34 EDD MINTWK MS	34 EDD MOF MS		34 EDD SASP MS	34 EDD SOF MS	34 EDD TWKEST MS	34 EDD TWKLST MS	34 EDD RAN MS	34 EDD WAP MS	34 EDD WPP MS
13		SASP	34 EDD FCFS SASP	34 EDD LALP SASP	34 EDD LCFS SASP	34 EDD MAXSLK SASP	34 EDD MAXTWK SASP	34 EDD MCS SASP	34 EDD MINLFT SASP	34 EDD MINSLK- MINWCS SASP	34 EDD MINTWK SASP	34 EDD MOF SASP	34 EDD MS SASP		34 EDD SOF SASP	34 EDD TWKEST SASP	34 EDD TWKLST SASP	34 EDD RAN SASP	34 EDD WAP SASP	34 EDD WPP SASP

Continuación Tabla 6.

ÍTEM	INSTANCIA	REGLA	FCFS	LALP	LCFS	MAXSLK	MAXTWK	MCS	MINLFT	MINSLK-MINWCS	MINTWK	MOF	MS	SASP	SOF	TWKEST	TWKLST	RAN	WAP	WPP	
14	34	SOF	34 EDD FCFS SOF	34 EDD LALP SOF	34 EDD LCFS SOF	34 EDD MAXSLK SOF	34 EDD MAXTWK SOF	34 EDD MCS SOF	34 EDD MINLFT SOF	34 EDD MINSLK- MINWCS SOF	34 EDD MINTWK SOF	34 EDD MOF SOF	34 EDD MS SOF	34 EDD SASP SOF		34 EDD TWKEST SOF	34 EDD TWKLST SOF	34 EDD RAN SOF	34 EDD WAP SOF	34 EDD WPP SOF	
15		TWKEST	34 EDD FCFS TWKEST	34 EDD LALP TWKEST	34 EDD LCFS TWKEST	34 EDD MAXSLK TWKEST	34 EDD MAXTWK TWKEST	34 EDD MCS TWKEST	34 EDD MINLFT TWKEST	34 EDD MINSLK- MINWCS TWKEST	34 EDD MINTWK TWKEST	34 EDD MOF TWKEST	34 EDD MS TWKEST	34 EDD SASP TWKEST	34 EDD SOF TWKEST		34 EDD TWKEST TWKEST	34 EDD TWKLST TWKEST	34 EDD RAN TWKEST	34 EDD WAP TWKEST	34 EDD WPP TWKEST
16		TWKLST	34 EDD FCFS TWKLST	34 EDD LALP TWKLST	34 EDD LCFS TWKLST	34 EDD MAXSLK TWKLST	34 EDD MAXTWK TWKLST	34 EDD MCS TWKLST	34 EDD MINLFT TWKLST	34 EDD MINSLK- MINWCS TWKLST	34 EDD MINTWK TWKLST	34 EDD MOF TWKLST	34 EDD MS TWKLST	34 EDD SASP TWKLST	34 EDD SOF TWKLST	34 EDD TWKEST TWKLST		34 EDD TWKLST TWKLST	34 EDD RAN TWKLST	34 EDD WAP TWKLST	34 EDD WPP TWKLST
17		RAN	34 EDD FCFS RAN	34 EDD LALP RAN	34 EDD LCFS RAN	34 EDD MAXSLK RAN	34 EDD MAXTWK RAN	34 EDD MCS RAN	34 EDD MINLFT RAN	34 EDD MINSLK- MINWCS RAN	34 EDD MINTWK RAN	34 EDD MOF RAN	34 EDD MS RAN	34 EDD SASP RAN	34 EDD SOF RAN	34 EDD TWKEST RAN	34 EDD TWKLST RAN		34 EDD RAN RAN	34 EDD WAP RAN	34 EDD WPP RAN
18		WAP	34 EDD FCFS WAP	34 EDD LALP WAP	34 EDD LCFS WAP	34 EDD MAXSLK WAP	34 EDD MAXTWK WAP	34 EDD MCS WAP	34 EDD MINLFT WAP	34 EDD MINSLK- MINWCS WAP	34 EDD MINTWK WAP	34 EDD MOF WAP	34 EDD MS WAP	34 EDD SASP WAP	34 EDD SOF WAP	34 EDD TWKEST WAP	34 EDD TWKLST WAP	34 EDD RAN WAP		34 EDD WAP WAP	34 EDD WPP WAP
19		WPP	34 EDD FCFS WPP	34 EDD LALP WPP	34 EDD LCFS WPP	34 EDD MAXSLK WPP	34 EDD MAXTWK WPP	34 EDD MCS WPP	34 EDD MINLFT WPP	34 EDD MINSLK- MINWCS WPP	34 EDD MINTWK WPP	34 EDD MOF WPP	34 EDD MS WPP	34 EDD SASP WPP	34 EDD SOF WPP	34 EDD TWKEST WPP	34 EDD TWKLST WPP	34 EDD RAN WPP	34 EDD WAP WPP		34 EDD WPP WPP

Fuente: Los autores

Para todas las PRs (19) se obtuvo un total de 5.814 combinaciones ($306 \times 19 = 5.814$) y para todas las instancias (14) un total de 81.396 combinaciones ($5.814 \times 14 = 81.396$).

En resumen, para las combinaciones de dos (2) PRs se realizaron 4.788 combinaciones y para las combinaciones de tres (3) PRs se realizaron 81.396 combinaciones, en la **Tabla 7** se presentan el total de combinaciones.

Tabla 7. Resumen del total de combinaciones

Combinación	Número de posibles combinaciones
Doble	4.788
Triple	81.396
Total	86.184

Fuente: Los autores

e. Análisis de resultados de las combinaciones

Una vez realizadas las combinaciones de 2 y 3 PRs se tabulan los resultados obtenidos, se utiliza la herramienta Análisis de Datos y la función de análisis Estadística Descriptiva de Excel obteniendo para cada una de las medidas de desempeño parámetros necesarios para el análisis estadístico como: Media, Moda, Mediana, Mínimo, Máximo, Desviación estándar y Varianza.

Teniendo en cuenta que esta investigación es la continuación de una fase anterior en la cual se evaluó el desempeño de 18 PRs de manera individual Aristizábal et al., (2017), éste trabajo comparó dichos resultados con los obtenidos de las 86.184 combinaciones dobles y triples con el fin de encontrar las mejores soluciones. Adicionalmente, para las mejores reglas obtenidas de un ranking global, se realizaron 30 repeticiones por cada una con el fin de analizar cuál es el efecto de la aleatoriedad en los resultados.

Se definió entonces el análisis de dichos resultados así:

- **Análisis de Medias (ANOM):** se tomaron las medias de las medidas de desempeño de todas las instancias para cada una de las reglas y combinaciones de 2 y 3 PRs. Luego por cada medida de desempeño se ordenaron de menor a mayor, estableciendo un ranking del cual se escogieron las 20 primeras reglas o combinaciones de reglas que corresponden a las que resultan con mejor desempeño en cada una de las 10 medidas de desempeño.

- **Diagrama de Pareto:** para realizar una comparación global del desempeño de las reglas o combinaciones, se escogieron las que se ubican en las 5 mejores posiciones por cada medida de desempeño y se realizó un diagrama de Pareto para observar cuáles son las reglas o combinaciones que tienen mejor desempeño.
- **Ranking Global:** con el fin de establecer las mejores reglas o combinaciones se realizó un ranking de las medias obtenidas para todas las medidas de desempeño. Para ello se realizó la estandarización de los resultados mediante el uso de función “Normalización” de Excel, con el fin de estandarizar todos los resultados de las medidas de desempeño y comparar los mismos.

Luego se elaboró un primer *ranking* de menor a mayor considerando sólo *Makespan*, también un segundo *ranking* a partir de una variable resumen (promedio) de las medidas de desempeño, sin incluir: tiempo computacional, *Program Maximum tardiness* y *Makespan*. Luego se seleccionaron los datos de los 100 primeros lugares en los dos (2) *rankings* con el fin de encontrar cuáles PRs se encuentran presentes en ambos.

Para la definición de los 100 primeros lugares se realizó con el asesor estadístico un análisis de los datos obtenidos, donde se identificó que las reglas en común encontradas en estos 100 lugares se ubicaban en posiciones similares. Al seguir buscando reglas en común después de estos 100 lugares se observó una gran diferencia en las posiciones de los dos (2) *rankings*, la cual se hacía mayor a medida que se aumentaba el número de posiciones seleccionadas. En consecuencia, se tomó la decisión de considerar como representativos y confiables los 100 primeros lugares.

- **Repeticiones de las mejores reglas o combinaciones:** para cada una de las mejores reglas o combinaciones obtenidas del *ranking* global se realizaron 30 repeticiones en el *software* y en un mismo computador, para cada una de las 14 instancias. Esto con el fin de analizar la variación que se puede presentar en los resultados teniendo en cuenta la aleatoriedad de los datos.

Para la definición del número de repeticiones, se tuvo en cuenta de la revisión bibliográfica que Browning & Yassine (2010) para la identificación de efectos aleatorios, usaron 20 repeticiones para cada prueba. Además, Yopez, (2013) recomienda para definir el número de repeticiones que sean entre 10 y 30 mediciones en cada prueba, ya que, con 10 mediciones se podrían detectar diferencias de medias mayores o iguales a 1.5 sigmas con una probabilidad alta, y con 30 mediciones se podrían detectar diferencias mayores o iguales a 0.7 sigmas.

Dadas estas dos (2) recomendaciones bibliográficas y teniendo en cuenta el concepto del asesor estadístico, se definió un número de 30 repeticiones para cada una de las 14 instancias.

- **Análisis estadístico para las mejores reglas o combinaciones:** con el fin de analizar cuál es el efecto de la aleatoriedad en la variación de los resultados obtenidos para determinar el nivel de confianza de los mismos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para una muestra de los datos que se obtienen como se describe a continuación: para cada una de las mejores reglas o combinaciones se realizan 30 repeticiones en el *software* y en un mismo computador, esto para cada una de las 14 instancias. Luego se realizó el tratamiento estadístico de los resultados así:

- El análisis de la varianza permite diferenciar la hipótesis nula que consiste en que las medias de K reglas de prioridad o combinaciones de las mismas son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Esta diferencia es fundamental en el análisis de resultados experimental, en el cual interesa comparar los resultados de K “tratamientos” o “factores” con respecto a la variable dependiente o de interés (Montgomery & Runger, 1996)

De acuerdo con lo anterior se planteó la hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_1 , tal como se observa en la Ecuación Hipótesis Nula (10) y Ecuación Hipótesis alternativa (11), respectivamente:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_K = \mu \quad (10)$$

Fuente: (Montgomery & Runger, 1996)

$$H_1: \exists \mu_j \neq \mu \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

Fuente: (Montgomery & Runger, 1996)

La forma de construcción conceptual del ANOVA requiere el cumplimiento de los siguientes supuestos:

- a. Las poblaciones (distribuciones de probabilidad de la variable dependiente correspondiente a cada factor) son normales.
- b. Las K muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
- c. Las poblaciones tienen todas igual varianza (homoscedasticidad).

En caso de que los resultados obtenidos no cumplan con los supuestos anteriores, existe un *test* para datos no paramétricos llamado “Prueba de Kruskal - Wallis” que se usa para probar si un grupo de datos proviene de la misma población.

Estos análisis de varianza se realizaron en el *software* IBM SPSS.

- **Regresión Lineal:** De acuerdo con uno de los objetivos específicos propuestos en esta investigación con el cual se pretende analizar la relación entre el uso de los recursos y la complejidad de la red con la minimización del tiempo de completamiento del multi-proyectos o *Makespan*, se utilizó como método de análisis una regresión lineal con la cual se busca encontrar la relación entre las variables: *Makespan*, AUF (carga promedio de recursos) y C (Complejidad) determinando si estas relaciones son significativas.

Para el modelo de regresión lineal se utilizó la Ecuación Regresión lineal por el método de mínimos cuadrados. (12)

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad (12)$$

Donde:

Y= *Makespan*

β_0 = Intercepto

β_1 = Coeficiente de regresión

β_2 = Estimador de X_2

X_1 = AUF estandarizado

X_2 = Complejidad del programa estandarizado

f. Identificación y caracterización de instancias de mayor complejidad

A continuación se explica la metodología empleada para caracterizar una instancia de mayor complejidad, teniendo en cuenta que es uno de los objetivos específicos planteados en esta investigación. Esto dado que las 14 instancias seleccionadas para el presente estudio son redes de complejidad baja y con éste objetivo se pretende dejar identificada y caracterizada una instancia con red de complejidad alta para en futuras investigaciones evaluar el desempeño de las PRs en la misma.

Según Tavares et al.. (1999), las redes de secuencias de actividades tienen diferentes características morfológicas las cuales pueden agruparse en tres perspectivas:

- La primera perspectiva indica la forma gráfica de la red. Esta tiene en cuenta: indicadores de tamaño expresado en términos del número de actividades de la red, indicadores de longitud que muestran que tan serial o paralela es la red representado en términos del número de pasos jerárquicos y el número de actividades.
- La segunda perspectiva indica la complejidad de la red y está representada en términos del número de flechas de longitud entre los diferentes niveles jerárquicos de la red y el número de actividades de esta. Lo que implica que una red con mayor número de flechas es más compleja que una red con un número mínimo de flechas.
- La tercera perspectiva indica la cantidad de niveles flotantes o cantidad de flechas de diferentes longitudes que presenta la red hasta llegar al último nivel jerárquico.

Existen varias formas de calcular la complejidad de una red, para el presente trabajo de grado se utilizará la propuesta de Browning & Yassine (2010), dónde: A' es el número de arcos no redundantes que indican relaciones de precedencia, N es el número de tareas y C es el índice de complejidad de la red, se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{4A' - 4N - 4}{(N - 2)^2}$$

Zuloaga (2017), señala que este tipo de medida de complejidad, solo considera las relaciones de precedencia y el número de actividades sin tener en cuenta las características topológicas de la red. Sin embargo, la ventaja es que es intuitiva y normaliza el resultado que podría estar entre 0 y 1. Las redes de alta complejidad tendrán más restricciones de precedencia, teniendo los valores de C más cerca de 1. Si el valor de C está en el intervalo: (a) $[0; 0.2]$ se categorizará como “bajo”, (b) $[0.2; 0.5]$ se considerará como “medio” y (c) $[0.5; 1]$ es “alto”.

Para la identificación y caracterización de la instancia de mayor complejidad se tomó como referencia el generador de instancias creado por Browninfg & Yassine (2016) que se encuentra disponible en la siguiente página WEB <http://sbuweb.tcu.edu/tbrowning/RCMPSPinstances.htm>; este generador de prueba contiene 12.320 problemas, cada problema contiene 3 proyectos, cada uno con 20 actividades y 4 tipos de recursos. Cada proyecto se representa como una matriz de estructura de diseño (DSM) en lugar de un diagrama de flujo o tabla de precedencia.

Los problemas se encuentran organizados de la siguiente manera:

- Se encuentran 20 archivos.ZIP, cada uno con 8 libros de trabajo en Excel y 77 problemas para un total de 616 problemas por archivo de trabajo.
- Cada uno de los 20 archivos contiene la misma estructura de hoja de cálculo básica y el mismo código VBA, aunque con diferentes problemas generados aleatoriamente con las mismas especificaciones.
- Cada libro de trabajo contiene el código generador RCMPSP, y la hoja de cálculo resumen en cada archivo tiene un “botón” incrustado en la hoja de trabajo que, cuando se presiona (y si las macros están habilitadas), regenerará los problemas según las especificaciones indicadas.
- Cada uno de los 8 libros de trabajo en Excel difiere en la configuración de complejidad (4 niveles: “HHH”, “HHL”, “HLL” o “LLL”) y la variación de MAUF (2 niveles: 0 o 0.25). Los 77 problemas en cada archivo difieren en los niveles NARLF y MAUF, con NARLF en siete niveles enteros sobre [-3, 3] y MAUF en once niveles de incremento de 0.1 sobre [0.6, 1.6]
- El generador de instancias de acuerdo con lo enunciado por Borwning & Yassine se le pueden modificar los cuatro (4) factores enunciados anteriormente, importante tener en cuenta que la instancia seleccionada para el caso de estudio actual contiene los mismos parámetros del experimento de Browning.

De los 20 archivos se seleccionó una instancia de mayor complejidad la cual contiene 3 proyectos cada una con 20 actividades, todos estos con complejidad mayor a 0.69 “HHH”; se seleccionó como instancia de mayor complejidad el problema 1 del Libro de trabajo en Excel # 1 (*Test Problem 1.xls.*) del primer archivo .ZIP (*Rep 1*).

Una vez seleccionada se caracterizó la instancia identificando los siguientes aspectos:

- Parámetros de la instancia
 - Complejidad
 - % Reprocesos
 - NARLF
 - AUF
 - MAUF
- Caracterización de proyectos
 - No. Proyectos
 - Costo de retraso por proyecto
 - Presupuesto
 - Prioridad
- Tipo de recursos
- Caracterización DSMs Proyectos

Finalmente se generó esta instancia en el formato en Excel establecido para el *software*, el cual esta dividido en cuatro secciones principales: información general, información de

los recursos, relaciones de precedencia e información de las actividades. Cada sección debe ir separada de las otras secciones mediante asteriscos (*) que el software interpreta como el final de cada una. para que en un futuro trabajo pueda ser utilizado y analizado en el software desarrollado por Aristizábal et al., (2017).

Este formato se muestra y se explica en la **Tabla 42. Información general del proyecto**, **Tabla 43. Descripción de los recursos cantidad disponible**, **Tabla 44. Relaciones de precedencia** y **Tabla 45. Duración y recursos globales**.

Es importante mencionar que el generador permite crear cualquier tipo de instancia, pero a modo de ejemplo y con el fin de cumplir con el objetivo específico planteado, se creó una red de complejidad alta.

g. Identificación y caracterización una instancia de un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia.

A continuación se describe la metodología empleada para caracterizar una instancia de un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia, que permita la futura aplicación del método heurístico que resulte de ésta investigación.

Se escogió un caso real del sector de la construcción en el Distrito de Agua Blanca (Valle del Cauca) en donde se identificó el número de proyectos y actividades, la ruta crítica, número de predecesoras y sucesoras, tipo y cantidad de recursos y sus costos asociados.

Una vez identificado lo anterior se organizó la información en el formato excel definido para el software desarrollado en la fase I de esta investigación (Aristizábal et al., 2017). Ver Anexo F.

5.1.2.4 Cierre

En esta última fase se realizó la entrega y sustentación del informe final, que incluye también la entrega del artículo y póster.

6. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos con sus respectivos análisis.

6.1. Descripción de resultados obtenidos.

Con el fin de presentar los resultados obtenidos durante la investigación, se muestra un ejemplo para la combinación doble (EDD FCFS) y para la combinación triple (EDD FCFS LALP) de la instancia 3

6.1.1. Salida (*Output*) del *Software*

El *software* utilizado arroja un archivo en Excel el cual contiene las siguientes hojas de cálculo: ruta crítica, métricas proyectos, métricas actividades, orden de ejecución y porcentaje uso de recursos, de las cuales se extraen los siguientes resultados:

- **Medidas de desempeño:** el *software* calculó los datos y calculó el resultado para: los 10 proyectos de la instancia 3, con sus respectivas medidas de desempeño (mostradas en la Tabla 8 en color naranja), al igual el cálculo de cada una de las medidas de desempeño para el programa total (mostradas en la **Tabla 8** en color azul) de la misma manera se muestra para la combinación triple en la **Tabla 9**.

Tabla 8. Métricas de proyecto - Combinación EDD FCFS para la instancia 3

	<i>Makespan</i>	<i>Mean flowtime</i>	<i>Maximum Lateness</i>	<i>Mean lateness</i>	<i>Tardiness</i>	<i>Maximum tardiness</i>	<i>Mean tardiness</i>	<i>Number of tardy projects</i>	<i>Number of tardy jobs</i>
Program	244	5,716667	197	89,4	26937	197	187,1	10	290
Project									
1	212	5,933333	175	66,46667	1994	175	71,21429	1	28
2	244	6,833333	197	82,16667	2465	197	85	1	29
3	202	5,533333	172	59,56667	1787	172	66,18519	1	27
4	231	5,3	187	104,1	3123	187	104,1	1	30
5	238	6,066667	194	99,2	2976	194	102,6207	1	29
6	232	5,533333	186	88,36667	2651	186	88,36667	1	30
7	229	5,7	185	84,93333	2548	185	84,93333	1	30
8	234	4,566667	196	97,16667	2915	196	97,16667	1	30
9	243	6,5	193	113,5667	3407	193	121,6786	1	28
10	227	5,2	186	102,3667	3071	186	105,8966	1	29

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

Tabla 9. Métricas de proyecto – Combinación EDD FCFS LALP para la instancia 3

	Makespan	Mean flowtime	Maximum Lateness	Mean lateness	Tardiness	Maximum tardiness	Mean tardiness	Number of tardy projects	Number of tardy jobs
Program	244	5,716666667	201	88,1	26524	201	183,6	10	289
Project									
1	234	5,933333333	188	44,63333333	1339	188	51,5	1	26
2	202	6,833333333	139	72,83333333	2185	139	75,34482759	1	29
3	215	5,533333333	181	72,3	2169	181	74,79310345	1	29
4	242	5,3	201	116,5333333	3496	201	116,5333333	1	30
5	244	6,066666667	196	108	3240	196	115,7142857	1	28
6	230	5,533333333	195	103,6	3108	195	103,6	1	30
7	228	5,7	191	86,03333333	2581	191	86,03333333	1	30
8	239	4,566666667	192	86,03333333	2581	192	89	1	29
9	206	6,5	155	102,1	3063	155	102,1	1	30
10	240	5,2	198	92,06666667	2762	198	98,64285714	1	28

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

- **Tiempo computacional en segundos (*Computing total time in Seconds*):** De la hoja de calculo orden de ejecución se obtiene el tiempo computacional, que para el caso de la combinación EDD FCFS para la instancia 3 es de: 13.667, tal como se observa en la **Tabla 10**.

En la **Tabla 11** se observa para la combinación EDD FCFS LALP para la instancia 3 que el tiempo computacional es de: 14.755.

Tabla 10. Orden de ejecución - *Computing total time in Seconds*
Combinación EDD FCFS para la instancia 3

Computing total time in Seconds	13,667
Makespan	244

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

Tabla 11. Orden de ejecución - *Computing total time in Seconds*
Combinación EDD FCFS LALP para la instancia 3

Computing total time in Seconds	14,755
Makespan	244

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

- **Factor de utilización media de los recursos (Average Utilization Factor) (AUF):** De la hoja de cálculo porcentaje uso de recursos se obtiene el valor de AUF para cada uno de los recursos y toma el mayor valor entre ellos, como se muestra en la **Tabla 12** (Combinación doble) y **Tabla 13** (Combinación triple).

Tabla 12. Porcentaje uso de recursos - Combinación EDD FCFS para la instancia 3

Resource distribution		
	R1	R2
AUF-k:	3,69356261	3,154850088
AUF(Max(AUF1, AUF2,...,AUFk)):	3,69356261	

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

Tabla 13. Porcentaje uso de recursos - Combinación EDD FCFS LALP para la instancia 3

Resource distribution		
	R1	R2
AUF-k:	3,69356261	3,154850088
AUF(Max(AUF1, AUF2,...,AUFk)):	3,69356261	

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

En el (Anexo A) se presentan los datos de salida de 86.184 combinaciones posibles, tanto de 2 como de 3 PRs.

6.1.2. Tabulación

Para las 14 instancias de cada una de las combinaciones dobles se realizó la tabulación de los datos descritos en la sección 6.1.1, consolidados como se muestra en la **Tabla 14**.

Tabla 14. PR-DESCRIPTIVA EDD FCFS

Método	Instancia	Proyectos	Complejidad Programa	Recursos	Actividades	AUF	Tiempo computacional	Program Makespan	Program Mean flowtime	Program Maximum Lateness	Program Mean lateness	Program Tardiness	Program Maximum tardiness	Program Mean tardiness	Program Number of tardy projects	Program Number of tardy jobs
EDD FCFS	3	10	0,006368419	2	32	3,693562610	13,67	244,00	5,72	197,00	89,40	26937,00	197,00	187,10	10	0
EDD FCFS	12	20	0,00511984	1	32	3,648533951	35,02	284,00	5,43	227,00	84,95	51280,00	227,00	210,20	20	524
EDD FCFS	24	10	0,00431458	3	92	0,849424460	21,60	120,00	5,54	26,00	6,50	6219,00	26,00	22,10	10	632
EDD FCFS	34	20	0,001786727	3	92	1,393508772	27,321	191,00	5,47	93,00	42,35	77092,00	93,00	84,85	20	1654
EDD FCFS	38	5	0,008676417	2	92	0,593153237	1,64	114,00	5,53	6,00	1,80	1033,00	6,00	5,60	5	308
EDD FCFS	45	10	0,003642678	1	122	3,383805805	11,18	482,00	5,57	384,00	161,80	194838,00	384,00	369,10	10	1116
EDD FCFS	49	2	0,013455365	3	122	1,388125000	1,92	151,00	5,53	73,00	30,50	7391,00	73,00	72,50	2	208
EDD FCFS	53	20	0,001070688	2	122	1,263990485	28,28	181,00	5,50	95,00	32,35	78714,00	95,00	78,60	20	2052
EDD FCFS	57	5	0,003311115	1	122	1,263990485	28,28	181,00	5,50	95,00	32,35	78714,00	95,00	78,60	20	2052
EDD FCFS	59	5	0,005312933	3	122	1,691037736	5,02	199,00	5,24	108,00	55,60	33746,00	108,00	106,40	5	568
EDD FCFS	99	5	0,008676417	4	92	3,376162791	4,48	317,00	5,37	246,00	99,00	44759,00	246,00	232,80	5	431
EDD FCFS	108	10	0,001647429	4	122	1,282763115	10,51	150,00	5,53	80,00	24,90	30604,00	80,00	64,70	10	1032
EDD FCFS	113	20	0,001070688	4	122	2,442954160	39,09	305,00	5,52	219,00	86,25	208159,00	219,00	177,50	20	2288
EDD FCFS	128	2	0,008401066	4	122	0,934545455	6,61	113,00	5,32	72,00	14,00	3383,00	72,00	58,50	2,00	194,00

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del software

Utilizando la herramienta Análisis de Datos y la función de análisis Estadística Descriptiva de MS Excel se obtienen para cada una de las medidas de desempeño los siguientes parámetros, tal como se observa en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Estadística descriptiva para la Combinación EDD FCFS

AUF	Tiempo computacional		Program Makespan		Program Mean flowtime		Program Maximum Lateness		Program Mean lateness		Program Tardiness		Program Maximum tardiness		Program Mean tardiness		Program Number of tardy projects		Program Number of tardy jobs		
Media	1,920 18016	Media	12,49 04615 4	Media	221,8 46153 8	Media	5,500 24572 6	Media	153	Media	53,22 69230 8	Media	57772 ,6153 8	Media	153	Media	123,6 11538 5	Media	10,692 30769	Media	846,76 92308
Error típico	0,334 01182 3	Error típico	3,820 51808 9	Error típico	31,76 77562 2	Error típico	0,026 87751 5	Error típico	33,75 38222	Error típico	13,84 54526 2	Error típico	19977 ,2135 6	Error típico	33,75 38222	Error típico	28,99 60547 5	Error típico	1,9558 74175	Error típico	203,27 46391
Mediana	1,388 125	Mediana	6,697	Mediana	190	Mediana	5,515	Mediana	101	Mediana	33,2	Mediana	30313	Mediana	101	Mediana	84,25	Mediana	10	Mediana	528
Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	10	Moda	#N/A
Desviación estándar	1,204 29675 6	Desviación estándar	13,77 50738 7	Desviación estándar	114,5 40274	Desviación estándar	0,096 90825 9	Desviación estándar	121,7 01136 7	Desviación estándar	49,92 04893 4	Desviación estándar	72028 ,8678 4	Desviación estándar	121,7 01136 7	Desviación estándar	104,5 46762 2	Desviación estándar	7,0520 04625	Desviación estándar	732,91 71342
Varianza de la muestra	1,450 33067 5	Varianza de la muestra	189,7 52660 1	Varianza de la muestra	13119 ,4743 6	Varianza de la muestra	0,009 39121 1	Varianza de la muestra	14811 ,1666 7	Varianza de la muestra	2492, 05525 6	Varianza de la muestra	51881 57803	Varianza de la muestra	14811 ,1666 7	Varianza de la muestra	10930 ,0254 8	Varianza de la muestra	49,730 76923	Varianza de la muestra	53716 7,5256
Curtosis	- 1,569 46808	Curtosis	1,268 51016 3	Curtosis	1,408 01439 6	Curtosis	1,665 66261 3	Curtosis	0,058 50464 6	Curtosis	0,471 73025 3	Curtosis	1,559 68870 3	Curtosis	0,058 50464 6	Curtosis	1,232 64050 2	Curtosis	- 1,4414 04098	Curtosis	- 0,2321 65759
Coefficiente de asimetría	0,562 7353	Coefficiente de asimetría	1,450 30451	Coefficiente de asimetría	1,239 57280 5	Coefficiente de asimetría	0,241 15102 7	Coefficiente de asimetría	0,946 72081 6	Coefficiente de asimetría	0,988 84427	Coefficiente de asimetría	1,579 82632 4	Coefficiente de asimetría	0,946 72081 6	Coefficiente de asimetría	1,175 04051	Coefficiente de asimetría	0,3811 44046	Coefficiente de asimetría	1,0533 98057
Rango	3,100 40937 3	Rango	41,79 5	Rango	391	Rango	0,395 83333 3	Rango	398	Rango	166,1	Rango	21454 8	Rango	398	Rango	363,2	Rango	18	Rango	2104
Mínimo	0,593 15323 7	Mínimo	0,766	Mínimo	107	Mínimo	5,320 83333 3	Mínimo	19	Mínimo	0,6	Mínimo	543	Mínimo	19	Mínimo	9,4	Mínimo	2	Mínimo	192
Máximo	3,693 56261	Máximo	42,56 1	Máximo	498	Máximo	5,716 66666 7	Máximo	417	Máximo	166,7	Máximo	21509 1	Máximo	417	Máximo	372,6	Máximo	20	Máximo	2296
Suma	24,96 23420 8	Suma	162,3 76	Suma	2884	Suma	71,50 31944 4	Suma	1989	Suma	691,9 5	Suma	75104 4	Suma	1989	Suma	1606, 95	Suma	139	Suma	11008
Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13	Cuenta	13
Mayor (1)	3,693 56261	Mayor (1)	42,56 1	Mayor (1)	498	Mayor (1)	5,716 66666 7	Mayor (1)	417	Mayor (1)	166,7	Mayor (1)	21509 1	Mayor (1)	417	Mayor (1)	372,6	Mayor (1)	20	Mayor (1)	2296
Menor (1)	0,593 15323 7	Menor (1)	0,766	Menor (1)	107	Menor (1)	5,320 83333 3	Menor (1)	19	Menor (1)	0,6	Menor (1)	543	Menor (1)	19	Menor (1)	9,4	Menor (1)	2	Menor (1)	192
Nivel de confianza (95.0%)	0,727 74924 6	Nivel de confianza (95.0%)	8,324 19382 9	Nivel de confianza (95.0%)	69,21 59948 2	Nivel de confianza (95.0%)	0,058 56107 5	Nivel de confianza (95.0%)	73,54 32608 5	Nivel de confianza (95.0%)	30,16 66498	Nivel de confianza (95.0%)	43526 ,6092 1	Nivel de confianza (95.0%)	73,54 32608 5	Nivel de confianza (95.0%)	63,17 69760 9	Nivel de confianza (95.0%)	4,2614 83745	Nivel de confianza (95.0%)	442,89 73916

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

De igual forma, para las 14 instancias de cada una de las combinaciones dobles se realizó la tabulación de los datos descritos en la **sección 6.1.1**, consolidados como se muestra en la **Tabla 16**

Tabla 16. PR-DESCRIPTIVA EDD FCFS LALP

Método	Instancia	Proyectos	Complejidad Programa	Recursos	Actividades	AUF	Tiempo computacional	Program Makespan	Program Mean flowtime	Program Maximum Lateness	Program Mean lateness	Program Tardiness	Program Maximum tardiness	Program Mean tardiness	Program Number of tardy projects	Program Number of tardy jobs
EDD FCFS LALP	3	10	0,006368419	2	32	3,693562610	14,76	244,00	5,72	201,00	88,10	26524,00	201,00	183,60	10	289
EDD FCFS LALP	12	20	0,00511984	1	32	3,648533951	7,20	276,00	5,43	230,00	83,10	50113,00	230,00	198,90	20	521
EDD FCFS LALP	24	10	0,00431458	3	92	0,849424460	7,68	110,00	5,54	26,00	6,70	6516,00	26,00	21,10	10	681
EDD FCFS LALP	34	20	0,001786727	3	92	1,393508772	14,37	186,00	5,47	94,00	42,10	76534,00	94,00	87,00	20	1660
EDD FCFS LALP	38	5	0,008676417	2	92	0,593153237	2,69	113,00	5,53	17,00	0,80	486,00	17,00	10,00	5	185
EDD FCFS LALP	45	10	0,003642678	1	122	3,383805805	7,39	480,00	5,57	383,00	157,60	189713,00	383,00	365,90	10	1118
EDD FCFS LALP	49	2	0,013455365	3	122	1,388125000	4,13	150,00	5,53	73,00	30,50	7470,00	73,00	73,00	2	207
EDD FCFS LALP	53	20	0,001070688	2	122	1,263990485	31,78	173,00	5,50	91,00	31,10	76019,00	91,00	76,70	20	2073
EDD FCFS LALP	57	5	0,003311115	1	122	0,711812235	4,31	104,00	5,47	35,00	4,20	2837,00	35,00	26,00	5	337
EDD FCFS LALP	59	5	0,005312933	3	122	1,691037736	4,75	195,00	5,24	113,00	56,20	33908,00	113,00	110,40	5	566
EDD FCFS LALP	99	5	0,008676417	4	92	3,376162791	4,28	322,00	5,37	254,00	106,20	48040,00	254,00	239,20	5	430
EDD FCFS LALP	108	10	0,001647429	4	122	1,282763115	14,13	146,00	5,53	80,00	24,20	29829,00	80,00	62,00	10	1042
EDD FCFS LALP	113	20	0,001070688	4	122	2,442954160	60,38	303,00	5,52	220,00	89,50	215933,00	220,00	182,35	20	2305
EDD FCFS LALP	128	2	0,008401066	4	122	0,934545455	2,88	110,00	5,32	63,00	12,50	3160,00	63,00	53,50	2	195

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

Utilizando la herramienta Análisis de Datos y la función de análisis Estadística Descriptiva de MS Excel se obtienen para cada una de las medidas de desempeño los siguientes parámetros, tal como se observa en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Estadística descriptiva para la Combinación EDD FCFS LALP

AUF	Tiempo computacional		Program Makespan		Program Mean flowtime		Program Maximum Lateness		Program Mean lateness		Program Tardiness		Program Maximum tardiness		Program Mean tardiness		Program Number of tardy projects		Program Number of tardy jobs		
Media	1,9038 12844	Media	13,21 17857 1	Media	206,8 57142 9	Media	5,481 77579 4	Media	135,2 14285 7	Media	50,66 07142 9	Media	53292 ,6428 6	Media	135,2 14285 7	Media	123,5 85714 3	Media	10,214 28571	Media	794,3 57142 9
Error típico	0,3096 67705	Error típico	5,107 10283	Error típico	28,57 29944 6	Error típico	0,030 98933 9	Error típico	27,98 41357 3	Error típico	12,03 53465	Error típico	17688 ,1671 4	Error típico	27,98 41357 3	Error típico	26,85 54164 2	Error típico	1,8728 20554	Error típico	187,0 18733 5
Mediana	1,3908 16886	Mediana	6,792 5	Mediana	178,5	Mediana	5,508 125	Mediana	97	Mediana	35,72 5	Mediana	31009	Mediana	97	Mediana	86,95	Mediana	10	Mediana	542
Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	#N/A	Moda	10	Moda	#N/A
Desviación estándar	1,1586 70455	Desviación estándar	19,10 90290 3	Desviación estándar	106,9 10355 8	Desviación estándar	0,115 95148 8	Desviación estándar	104,7 07048 2	Desviación estándar	45,03 21431 3	Desviación estándar	66183 ,0612 4	Desviación estándar	104,7 07048 2	Desviación estándar	100,4 83767 2	Desviación estándar	7,0074 52861	Desviación estándar	699,7 60025 6
Varianza de la muestra	1,3425 17224	Varianza de la muestra	365,1 54990 5	Varianza de la muestra	11429 ,8241 8	Varianza de la muestra	0,013 44474 8	Varianza de la muestra	10963 ,5659 3	Varianza de la muestra	2027, 89391 5	Varianza de la muestra	43801 97595	Varianza de la muestra	10963 ,5659 3	Varianza de la muestra	10096 ,9874 7	Varianza de la muestra	49,104 3956	Varianza de la muestra	48966 4,093 4
Curtosis	- 1,3521 62731	Curtosis	7,974 44781	Curtosis	1,747 97910 9	Curtosis	1,100 03871 2	Curtosis	0,302 87440 8	Curtosis	0,244 81211 4	Curtosis	2,144 72962 8	Curtosis	0,302 87440 8	Curtosis	1,075 15380 7	Curtosis	- 1,3289 08348	Curtosis	0,101 33625 6
Coeficiente de asimetría	0,6245 33338	Coeficiente de asimetría	2,730 77557 3	Coeficiente de asimetría	1,286 87547 8	Coeficiente de asimetría	- 0,304 42229	Coeficiente de asimetría	0,965 45441 2	Coeficiente de asimetría	0,869 98574 9	Coeficiente de asimetría	1,702 68082 9	Coeficiente de asimetría	0,965 45441 2	Coeficiente de asimetría	1,125 17317 7	Coeficiente de asimetría	0,5149 65075	Coeficiente de asimetría	1,143 98842 1
Rango	3,1004 09373	Rango	71,16 7	Rango	384	Rango	0,475	Rango	355	Rango	152,4	Rango	21022 5	Rango	355	Rango	357,1	Rango	18	Rango	2100
Mínimo	0,5931 53237	Mínimo	1,658	Mínimo	92	Mínimo	5,241 66666 7	Mínimo	19	Mínimo	0,6	Mínimo	395	Mínimo	19	Mínimo	9,5	Mínimo	2	Mínimo	157
Máximo	3,6935 6261	Máximo	72,82 5	Máximo	476	Máximo	5,716 66666 7	Máximo	374	Máximo	153	Máximo	21062 0	Máximo	374	Máximo	366,6	Máximo	20	Máximo	2257
Suma	26,653 37981	Suma	184,9 65	Suma	2896	Suma	76,74 48611 1	Suma	1893	Suma	709,2 5	Suma	74609 7	Suma	1893	Suma	1730, 2	Suma	143	Suma	11121
Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14	Cuenta	14
Mayor (1)	3,6935 6261	Mayor (1)	72,82 5	Mayor (1)	476	Mayor (1)	5,716 66666 7	Mayor (1)	374	Mayor (1)	153	Mayor (1)	21062 0	Mayor (1)	374	Mayor (1)	366,6	Mayor (1)	20	Mayor (1)	2257
Menor (1)	0,5931 53237	Menor (1)	1,658	Menor (1)	92	Menor (1)	5,241 66666 7	Menor (1)	19	Menor (1)	0,6	Menor (1)	395	Menor (1)	19	Menor (1)	9,5	Menor (1)	2	Menor (1)	157
Nivel de confianza (95,0%)	0,6689 96403	Nivel de confianza (95,0%)	11,03 32248 8	Nivel de confianza (95,0%)	61,72 82016 6	Nivel de confianza (95,0%)	0,066 94839 6	Nivel de confianza (95,0%)	60,45 60497	Nivel de confianza (95,0%)	26,00 07853 5	Nivel de confianza (95,0%)	38212 ,9618 8	Nivel de confianza (95,0%)	60,45 60497	Nivel de confianza (95,0%)	58,01 75998 8	Nivel de confianza (95,0%)	4,0459 82825	Nivel de confianza (95,0%)	404,0 2941

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

Esta tabulación y el correspondiente análisis estadístico descriptivo se realiza para todas y cada una de las combinaciones triples. Ver sección 6.6 y [\(Anexo B\)](#).

Se consolidaron los resultados obtenidos para cada una de las medidas de desempeño, agregando los presentados por Aristizábal et al., (2017) para las PRs de manera individual, donde se obtuvieron un total de 6.175 resultados por cada medida de desempeño. En la **Tabla 18** se muestra un fragmento de dicha consolidación que se puede ver completa en el [\(Anexo C\)](#). Estos resultados corresponden al promedio de cada una de las medidas de desempeño de una PR o combinación para las 14 instancias.

Tabla 18. Tabla resumen de consolidación de los resultados obtenidos para las medidas de desempeño de las reglas de prioridad y sus combinaciones dobles y triples.

<i>Método</i>	<i>AUF</i>	<i>Tiempo computacional</i>	<i>Program Makespan</i>	<i>Program Mean flowtime</i>	<i>Program Maximum Lateness</i>	<i>Program Mean lateness</i>	<i>Program Tardiness</i>	<i>Program Maximum tardiness</i>	<i>Program Mean tardiness</i>	<i>Program Number of tardy projects</i>	<i>Program Number of tardy jobs</i>
FCFS	1,795347236	19,87	209,14	5,32	122,71	31,18	1056,86	122,71	95,76	10,29	578,36
LALP	1,795347236	19,59	210,43	5,32	126,79	30,43	1032,43	126,79	93,35	10,29	578,57
EDD	1,795347236	21,12	203,86	5,32	108,36	29,70	1068,43	108,36	95,03	10,21	582,50
LCFS	1,795347236	20,83	215,00	5,32	127,21	30,69	1036,93	127,21	94,64	10,29	584,36
MAXSLK	1,795347236	18,52	215,07	5,32	128,93	31,78	1034,86	128,93	95,51	10,29	587,29
MAXSLK EDD	1,903812844	12,40	216,57	5,48	134,50	54,08	56189,50	134,50	116,41	10,29	820,29

Continuación Tabla 18

<i>Método</i>	<i>AUF</i>	<i>Tiempo computacional</i>	<i>Program Makespan</i>	<i>Program Mean flowtime</i>	<i>Program Maximum Lateness</i>	<i>Program Mean lateness</i>	<i>Program Tardiness</i>	<i>Program Maximum tardiness</i>	<i>Program Mean tardiness</i>	<i>Program Number of tardy projects</i>	<i>Program Number of tardy jobs</i>
MAXSLK EDD FCFS	1,903812844	10,52	216,86	5,48	130,93	54,05	55627,71	130,93	116,69	10,29	823,14
LCFS EDD FCFS	1,903812844	10,79	210,43	5,48	133,50	52,81	54832,43	133,50	120,95	10,29	823,71
FCFS EDD LALP	1,903812844	16,43	208,21	5,48	146,93	52,73	55002,57	146,93	123,98	10,29	827,43
EDD FCFS LALP	1,903812844	12,91	208,00	5,48	134,29	52,34	54791,57	134,29	120,69	10,29	829,21
FCFS EDD	1,903812844	14,59	211,00	5,48	144,57	52,73	55116,50	144,57	123,81	10,29	829,21
LALP EDD FCFS	1,903812844	12,01	208,86	5,48	136,57	52,79	55250,14	136,57	118,80	10,29	829,29
EDD FCFS	1,903812844	14,99	211,00	5,48	132,71	52,40	54785,21	132,71	121,43	10,29	830,64
LALP EDD	1,903812844	13,76	208,36	5,48	146,86	52,61	54620,00	146,86	123,71	10,29	831,21
LCFS EDD	1,903812844	14,03	210,36	5,48	145,07	52,40	54722,00	145,07	124,23	10,29	833,43

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software*

6.2. Análisis de medias (ANOM)

El análisis de medias ANOM tuvo como objetivo establecer la efectividad de cada regla o combinación de PRs en la búsqueda de la minimización de cada medida de desempeño con el fin de determinar las mejores.

Para el análisis, se tomó la media de las medidas de desempeño de todas las instancias para cada una de las reglas y combinaciones de 2 y 3 PRs. Luego, por cada medida de desempeño, se ordenaron de menor a mayor, estableciendo un ranking del cual se escogieron las 20 primeras reglas o combinaciones de reglas, que corresponden a las que resultan con mejor desempeño.

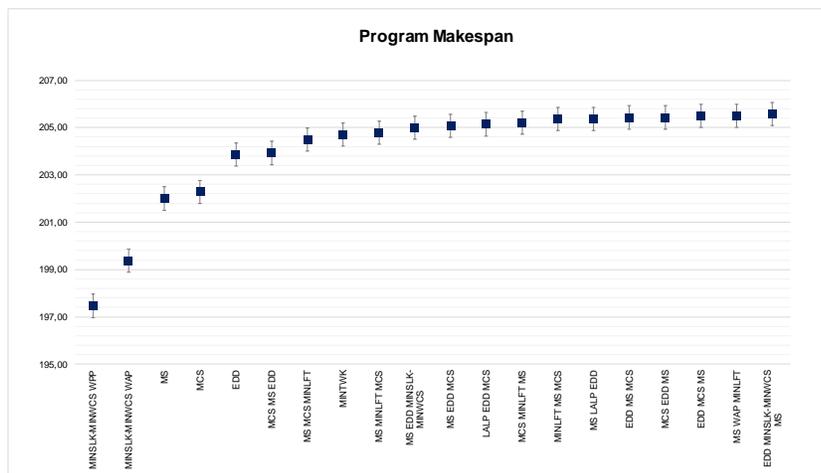
6.2.1. Tiempo computacional

Esta medida de desempeño no se tuvo en cuenta para este análisis de resultados toda vez que el volumen de datos obtenido (86.184) requirió el uso de varios computadores con diferentes características, por lo tanto, no es comparable esta medida.

6.2.2. Program Makespan

Gráfica 1. Ranking de resultados para Program Makespan

Método (PR Combination)	Program Makespan
MNSLK-MINWCS WPP	197,46
MNSLK-MINWCS WAP	199,38
MS	202,00
MCS	202,29
EDD	203,86
MCS MS EDD	203,93
MS MCS MINLFT	204,50
MINTVK	204,71
MS MINLFT MCS	204,79
MS EDD MNSLK-MINWCS	205,00
MS EDD MCS	205,07
LALP EDD MCS	205,14
MCS MINLFT MS	205,21
MINLFT MS MCS	205,36
MS LALP EDD	205,36
EDD MS MCS	205,43
MCS EDD MS	205,43
EDD MCS MS	205,50
MS WAP MINLFT	205,50
EDD MNSLK-MINWCS MS	205,57



Fuente: Los autores

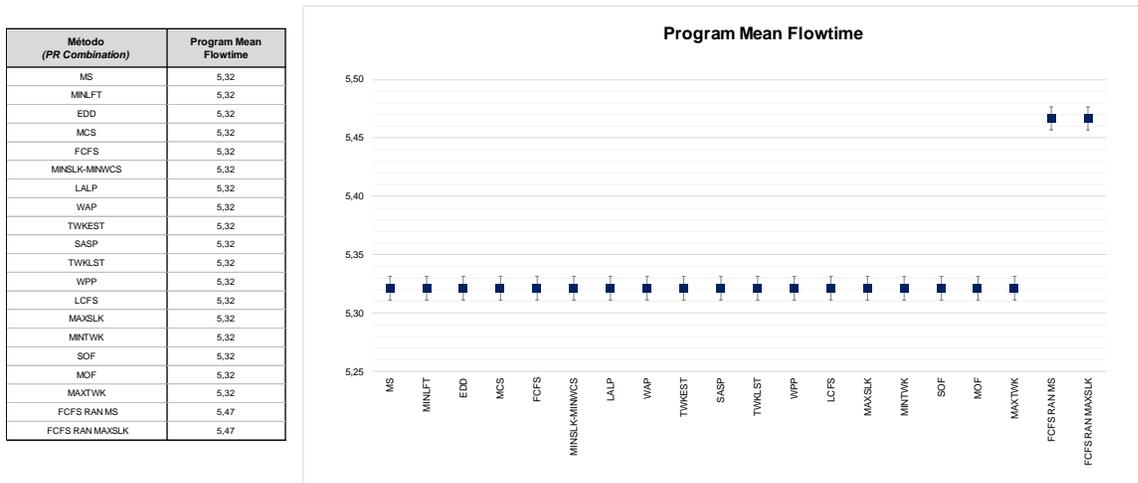
El *makespan* es una de las medidas más concluyentes en problemas de tipo RCPSP y RCMPSP, dado que minimizar la duración total del proyecto (*makespan*) es, sin duda, el

más popular y discutido en la literatura de programación de proyectos. (Kolisch (1996b), Herroelen (2005), Hartmann et al., (2010)).

En la Gráfica 1 se observa que la combinación MINSLK-MINWCS WPP presentó mejor resultado en la minimización del *makespan*, la cual establece que se programan las actividades que tengan holgura mínima y después el criterio de decisión es hacer las actividades del proyecto que el usuario prioriza, con el fin de disminuir la probabilidad de retrasos en el tiempo total del proyecto.

6.2.3. Program mean flow time

Gráfica 2. Ranking de resultados para Program mean flow time



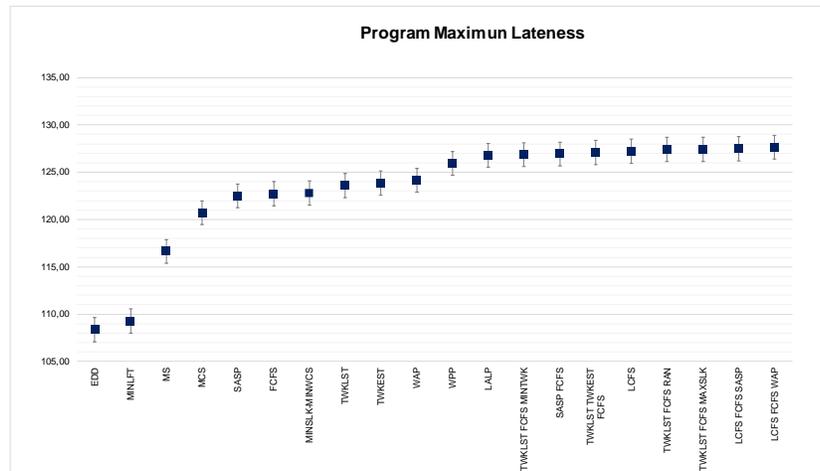
Fuente: Los autores

Para el *mean flow time* no se observan diferencias en el desempeño de los métodos, todas las PRs tuvieron el un comportamiento similar como se observa en la **Gráfica 2**, esto se debe a la característica de duración constante para las actividades, es decir, se plantea una única forma de ejecutar las actividades con una única combinación de recursos globales, y por lo tanto una sola duración para cada actividad que no cambia de acuerdo a la regla de prioridad usada.

6.2.4. Program maximum lateness y Program Maximum tardiness

Gráfica 3. Ranking de resultados para Program maximum lateness

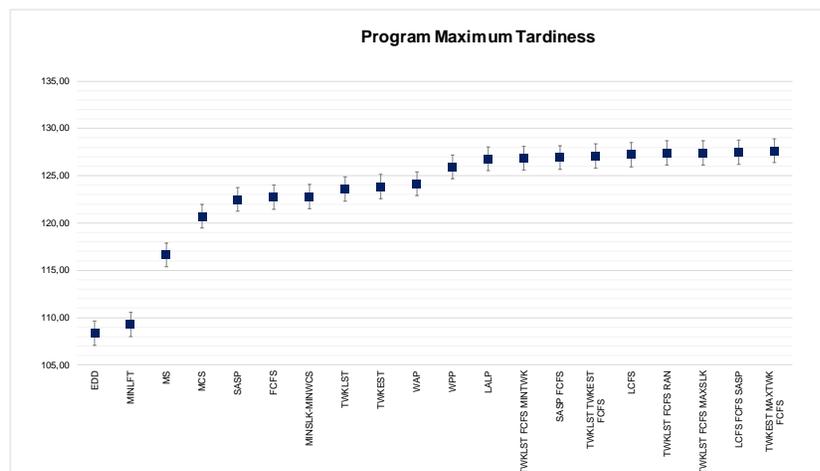
Método (PR Combination)	Program Maximun Lateness
EDD	108,36
MINLFT	109,29
MS	116,64
MCS	120,71
SASP	122,50
FCFS	122,71
MNSLK-MINWCS	122,79
TWKLST	123,57
TWKEST	123,86
WAP	124,14
WPP	125,93
LALP	126,79
TWKLST FCFS MINTWK	126,86
SASP FCFS	126,93
TWKLST TWKEST FCFS	127,07
LCFS	127,21
TWKLST FCFS RAN	127,43
TWKLST FCFS MAXSLK	127,43
LCFS FCFS SASP	127,50
LCFS FCFS WAP	127,64



Fuente: Los autores

Gráfica 4. Ranking de resultados para Program maximum tardiness

Método (PR Combination)	Program Maximum Tardiness
EDD	108,36
MINLFT	109,29
MS	116,64
MCS	120,71
SASP	122,50
FCFS	122,71
MNSLK-MINWCS	122,79
TWKLST	123,57
TWKEST	123,86
WAP	124,14
WPP	125,93
LALP	126,79
TWKLST FCFS MINTWK	126,86
SASP FCFS	126,93
TWKLST TWKEST FCFS	127,07
LCFS	127,21
TWKLST FCFS RAN	127,43
TWKLST FCFS MAXSLK	127,43
LCFS FCFS SASP	127,50
TWKEST MAXTWK FCFS	127,64



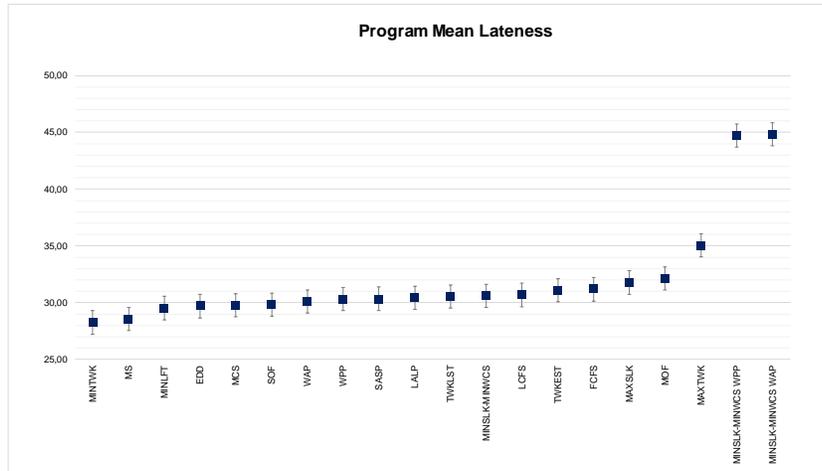
Fuente: Los autores

Para el *maximum lateness* y *program maximum tardiness* la mejor secuencia fue dada por la regla EDD tal como se observa en la **Gráfica 3** y **Gráfica 4**, lo cual confirma que tanto *maximum lateness* como *maximum tardiness* es minimizado por la regla de prioridad en donde se programa la actividad con mínimo comienzo tardío. Se encuentra un comportamiento similar a EDD con MINLFT la cual da prioridad a las actividades con mínimo final tardío. Como se evidenció en la Fase I.

6.2.5. Program Mean Lateness

Gráfica 5. Ranking de resultados para Program Mean lateness

Método (PR Combination)	Program Mean Lateness
MINTWK	28,26
MS	28,56
MINLFT	29,53
EDD	29,70
MCS	29,76
SOF	29,84
WAP	30,11
WPP	30,31
SASP	30,35
LALP	30,43
TWKLST	30,54
MNSLK-MINWCS	30,61
LCFS	30,69
TWKEST	31,10
FCFS	31,18
MAXSLK	31,78
MOF	32,15
MAXTWK	35,06
MNSLK-MINWCS WPP	44,73
MNSLK-MINWCS WAP	44,83



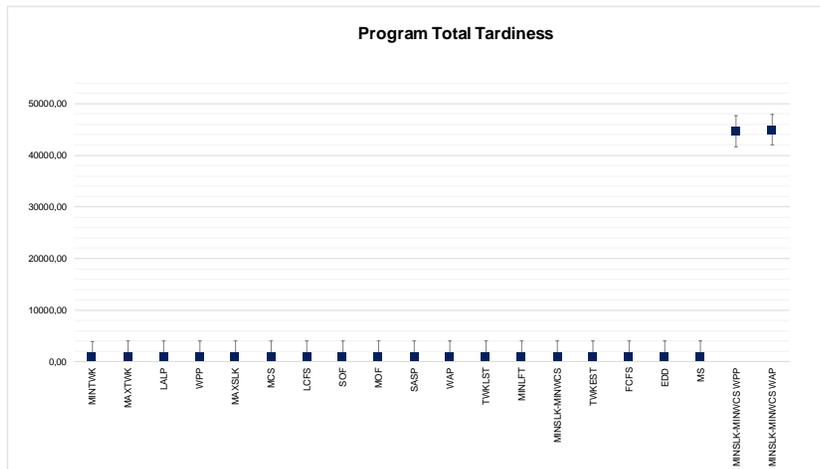
Fuente: Los autores

Para el *mean lateness* como se observa en la **Gráfica 5**, la mejor PR es MINTWK, la cual es una regla basada en actividad y en recursos, seguidas de MS, MINLFT y EDD basadas en actividad.

6.2.6. Program Total tardiness

Gráfica 6. Ranking de resultados para Program Total tardiness

Método (PR Combination)	Program Total Tardiness
MINTWK	962,71
MAXTWK	1031,43
LALP	1032,43
WPP	1033,57
MAXSLK	1034,86
MCS	1036,93
LCFS	1036,93
SOF	1042,64
MOF	1042,71
SASP	1045,36
WAP	1046,86
TWKLST	1049,71
MINLFT	1050,36
MNSLK-MINWCS	1050,86
TWKEST	1054,14
FCFS	1056,86
EDD	1068,43
MS	1077,93
MNSLK-MINWCS WPP	44624,46
MNSLK-MINWCS WAP	44959,69



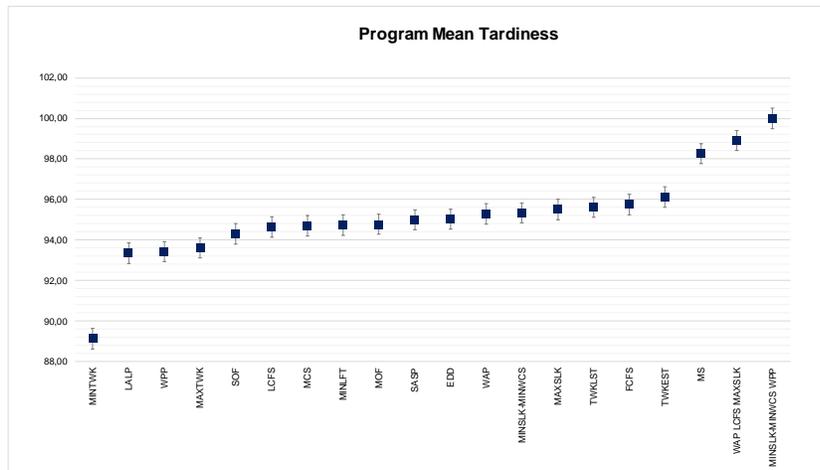
Fuente: Los autores

Para *program total tardiness* tal como se observa en la **Gráfica 6**, la mejor regla de prioridad fue MINTWK y se observa una gran diferencia con las combinaciones realizadas que oscilan arriba de los 40.000.

6.2.7. Program Mean tardiness

Gráfica 7. Ranking de resultados para Program Mean tardiness

Método (PR Combination)	Program Mean Tardiness
MINTWK	89,14
LALP	93,35
WPP	93,43
MAXTWK	93,61
SOF	94,31
LCFS	94,64
MCS	94,70
MINLFT	94,74
MOF	94,78
SASP	95,00
EDD	95,03
WAP	95,29
MINSLK-MINWCS	95,34
MAXSLK	95,51
TWKLST	95,62
FCFS	95,76
TWKEST	96,13
MS	98,26
WAP LCFS MAXSLK	98,90
MINSLK-MINWCS WPP	100,01



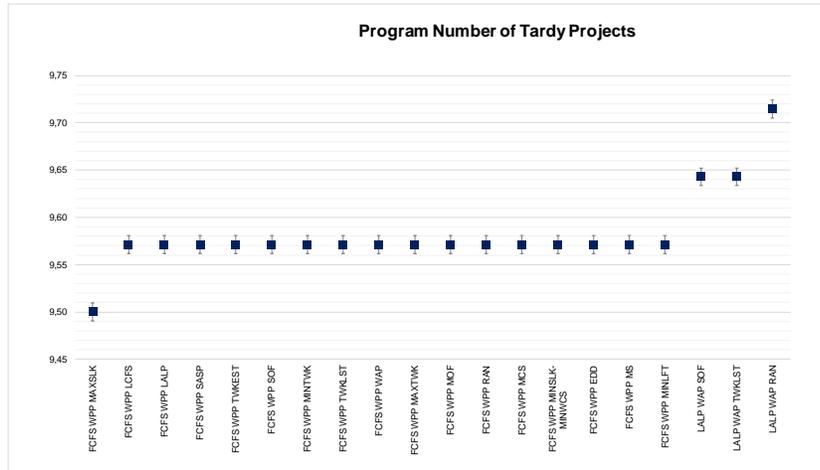
Fuente: Los autores

Para el *Program Mean Tardiness* como puede observarse en la **Gráfica 7**, la mejor regla de prioridad fue MINTWK, y la peor fue MINSLK-MINWCS WPP, puede observarse que las 8 primeras están basadas en actividad.

6.2.8. Program Number of Tardy Projects

Gráfica 8. Ranking de resultados para Program Number of Tardy Projects

Método (PR Combination)	Program Number of Tardy Projects
FCFS WPP MAXSLK	9,50
FCFS WPP LCFS	9,57
FCFS WPP LALP	9,57
FCFS WPP SASP	9,57
FCFS WPP TWKEST	9,57
FCFS WPP SOF	9,57
FCFS WPP MINTWK	9,57
FCFS WPP TWKLSLST	9,57
FCFS WPP WAP	9,57
FCFS WPP MAXTWK	9,57
FCFS WPP MOF	9,57
FCFS WPP RAN	9,57
FCFS WPP MCS	9,57
FCFS WPP MNSLK-MNWCS	9,57
FCFS WPP EDD	9,57
FCFS WPP MS	9,57
FCFS WPP MINLFT	9,57
LALP WAP SOF	9,64
LALP WAP TWKLSLST	9,64
LALP WAP RAN	9,71



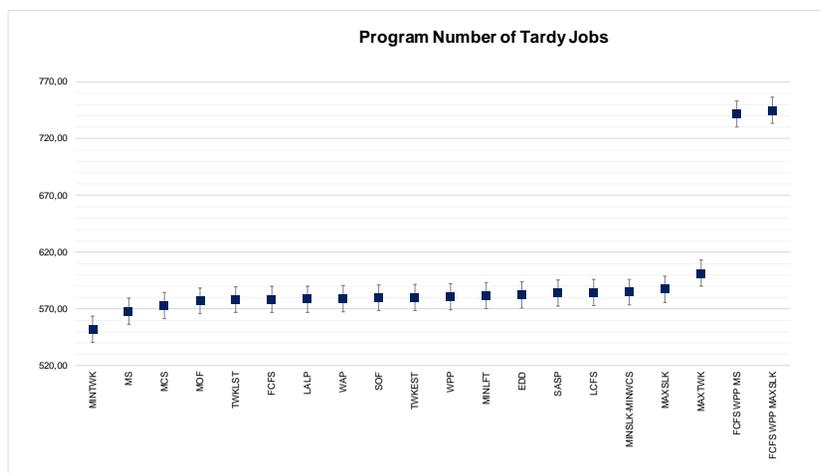
Fuente: Los autores

Se puede observar en la **Gráfica 8**, la regla de prioridad que mejor desempeño tuvo fue FCFS WPP MAXSLK, de esta combinación dos (2) de las reglas son basadas en actividad y la otra (WPP) es de prioridad de proyecto definida por el usuario. De igual manera, se puede observar que en los primeros diecisiete (17) lugares, las reglas de prioridad más común en las combinaciones son FCFS y WPP.

6.2.9. Program Number of tardy jobs

Gráfica 9. Ranking de resultados para Program Number of tardy jobs

Método (PR Combination)	Program Number of Tardy Jobs
MINTWK	552,00
MS	567,86
MCS	573,14
MOF	577,07
TWKLSLST	578,21
FCFS	578,36
LALP	578,57
WAP	578,86
SOF	579,93
TWKEST	580,07
WPP	580,79
MINLFT	581,93
EDD	582,50
SASP	584,07
LCFS	584,36
MNSLK-MNWCS	584,86
MAXSLK	587,29
MAXTWK	601,43
FCFS WPP MS	741,57
FCFS WPP MAXSLK	745,00



Fuente: Los autores

El mejor desempeño para *Program Number of Tardy Jobs* lo tienen las reglas de prioridad individual y la mejor es MINTWK, que es basada en actividad y recurso. De lo anterior se concluye que para disminuir el número de tareas tardías en los multi-proyectos son más eficaces las reglas individuales, mientras que para disminuir el número de proyectos tardíos lo son las combinaciones triples.

6.3. Diagrama de Pareto

Para realizar una comparación global de las reglas o combinaciones entre todas las medidas de desempeño, se escogieron las 5 primeras o mejores en el *ranking* que se realizó para las nueve (9) medidas de desempeño sin incluir tiempo computacional, como por ejemplo para *Program Makespan* la regla o combinación en el primer lugar es MINSLK-MINWCS WPP y en el quinto lugar EDD. Así como para las demás medidas de desempeño, tal como es muestra en la **Tabla 18**.

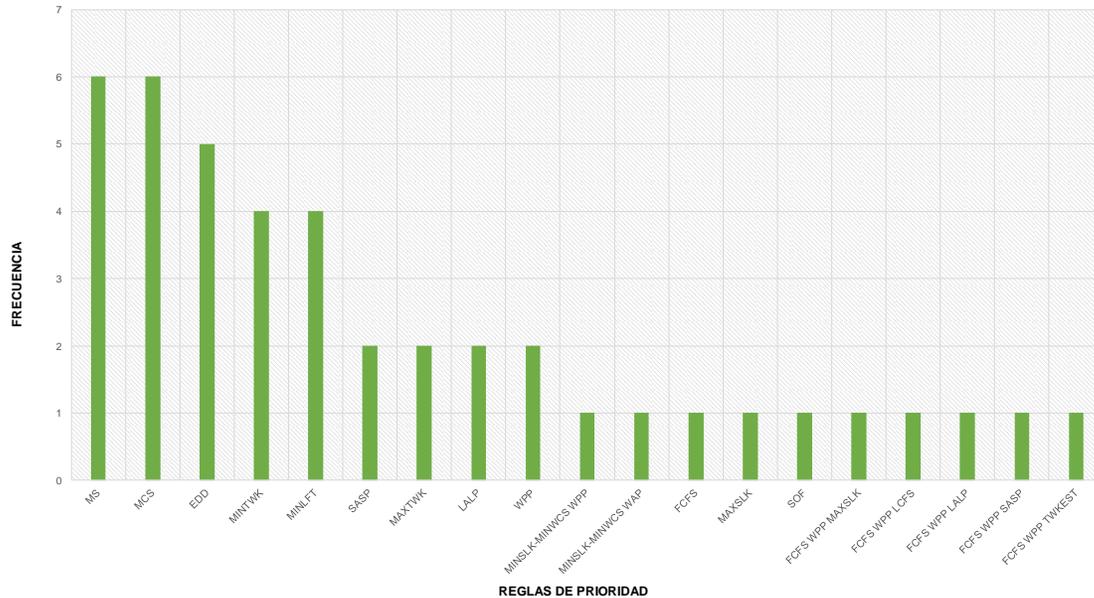
Tabla 18. Mejores reglas de prioridad para cada medida de desempeño

<i>Program Makespan</i>	<i>Program Mean flowtime</i>	<i>Program Maximum Lateness</i>	<i>Program Mean lateness</i>	<i>Program Tardiness</i>	<i>Program Maximum tardiness</i>	<i>Program Mean tardiness</i>	<i>Program Number of tardy projects</i>	<i>Program Number of tardy jobs</i>
MINSLK-MINWCS WPP	MS	EDD	MINTWK	MINTWK	EDD	MINTWK	FCFS WPP MAXSLK	MINTWK
MINSLK-MINWCS WAP	MINLFT	MINLFT	MS	MAXTWK	MINLFT	LALP	FCFS WPP LCFS	MS
MS	EDD	MS	MINLFT	LALP	MS	WPP	FCFS WPP LALP	MCS
MCS	MCS	MCS	EDD	WPP	MCS	MAXTWK	FCFS WPP SASP	MOF
EDD	FCFS	SASP	MCS	MAXSLK	SASP	SOF	FCFS WPP TWKEST	TWKLST

Fuente: Los autores

Seguidamente se realizó un diagrama de pareto para observar cuales tenían mejor desempeño, siendo las de mayor frecuencia MS y MCS, tal como es muestra en la **Gráfica 10**.

Gráfica 10. Pareto de las mejores Reglas de Prioridad



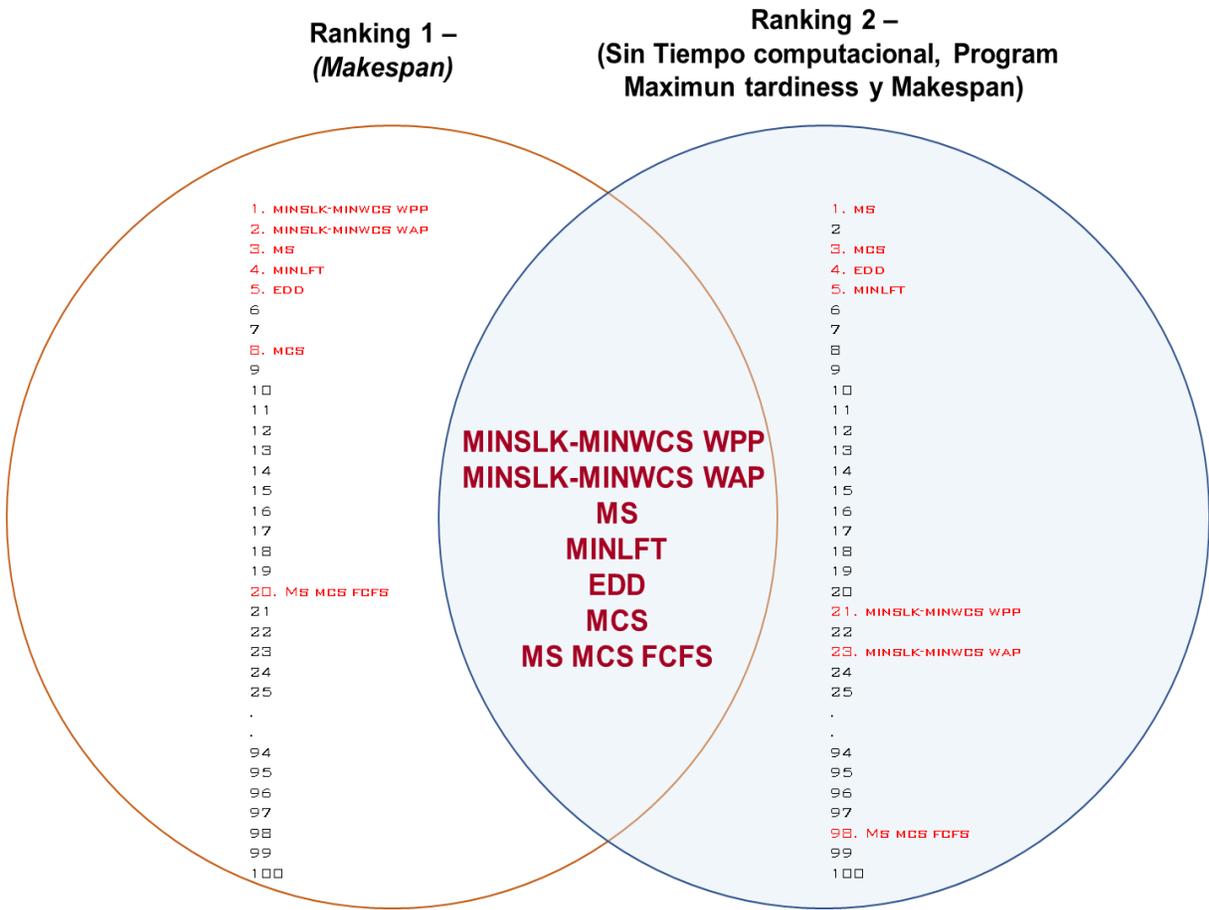
Fuente: Los autores

6.4. Ranking global

Se realizó la estandarización de los resultados de las medidas de desempeño registrados en la **Tabla 18**. Se elaboró un primer *ranking* de menor a mayor considerando sólo *Makespan*, pues es la medida más importante. Luego se generó un segundo *ranking* a partir de una variable resumen (promedio) de las medidas de desempeño, sin incluir: tiempo computacional, *Program Maximum tardiness* y *Makespan*, por las siguientes razones: Tiempo computacional, toda vez que las simulaciones se realizaron en computadores diferentes; *Program Maximum Tardiness* presentó exactamente los mismo resultados de *Program Maximum Lateness*, por esta razón se dejó sólo uno de ellos y *Makespan*, porque el objetivo del *ranking 2* es verificar el comportamiento de las medidas de desempeño sin incluirlo. En el (Anexo D) se adjuntan los *ranking 1* y *2* completos.

Seleccionando los datos de los 100 primeros lugares en los dos (2) *rankings*, solamente se encontraron siete (7) PRs presentes en ambos: **MINSLK-MINWCS WPP, MINSLK-MINWCS WAP, MS, MINLFT, EDD, MCS y MS MCS FCFS**. Son estas siete (7) reglas de prioridad entonces las que tienen el mejor desempeño. El anterior procedimiento se representa a través de la **Ilustración 13** y en la **Tabla 19** se observa el resumen de *ranking* global.

Ilustración 13. Representación de como se seleccionaron las mejores reglas de prioridad



Fuente: Los autores

Tabla 19. Resumen *Ranking* global

Metodo	Program Makespan estandarizado	Program Mean flowtime estandarizado	Program Maximum Lateness estandarizado	Program Mean lateness estandarizado	Program Tardiness estandarizado	Program Mean tardiness estandarizado	Program Number of tardy projects estandarizado	Program Number of tardy jobs estandarizado	Promedio	Promedio 2 (Sin Makespan)	Ranking 1 (Makespan)	Ranking (Sin Makespan)
MINSLK-MINWCS WPP	-3,336	0,054	-2,207	-3,691	-3,054	-2,874	0,634	-0,702	-1,897	-1,692	1	21
MINSLK-MINWCS WAP	-3,004	0,054	-2,194	-3,646	-2,955	-2,153	0,634	-0,831	-1,762	-1,584	2	23
MS	-2,550	-18,424	-4,849	-10,962	-15,930	-3,151	-6,859	-14,558	-9,660	-10,676	3	1
MINLFT	-2,500	-18,424	-6,119	-10,526	-15,938	-3,706	-1,338	-13,745	-9,037	-9,971	4	5
EDD	-2,228	-18,424	-6,280	-10,450	-15,933	-3,661	-1,338	-13,712	-9,003	-9,971	5	4
MCS	-2,081	-18,424	-4,145	-10,423	-15,942	-3,713	-4,099	-14,253	-9,135	-10,143	8	3
MS MCS FCFS	-1,932	0,054	-1,836	-1,191	-0,579	0,608	0,240	-1,224	-0,733	-0,561	20	98

Fuente: Los autores

6.5. Resultados de las repeticiones de las mejores reglas o combinaciones

Para cada una de las 7 mejores reglas o combinaciones obtenidas del ranking global se realizaron 30 repeticiones del *software* en un mismo computador, para cada una de las 14 instancias. Las especificaciones del equipo utilizado son presentadas en la **Ilustración 14**.

Ilustración 14. Especificaciones computador utilizado para correr las instancias

Edición de Windows	
Windows 10 Pro	
© 2017 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.	
Sistema	
Procesador:	Intel(R) Core(TM) i5-7600 CPU @ 3,50GHz 3.50 GHz
Memoria instalada (RAM):	8,00 GB (7,89 GB utilizable)
Tipo de sistema:	Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
Lápiz y entrada táctil:	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla
Configuración de nombre, dominio y grupo de trabajo del equipo	
Nombre de equipo:	USUARIO-PC
Nombre completo de equipo:	USUARIO-PC
Descripción del equipo:	
Grupo de trabajo:	WORKGROUP
Activación de Windows	
Windows está activado Lea los Términos de licencia del software de Microsoft	
Id. del producto: 00331-10000-00001-AA073	

Fuente: Los autores

Para cada una de las 7 PRs se obtuvieron 420 resultados por cada una de las medidas de desempeño, para un total de 2.940. En la **Tabla 20** se muestra el ejemplo de los resultados para la regla MS MSC FCFS para la instancia 3 y el cambio a a la instancia 12 indicando que se realizan para todas las instancias. Los resultados para las 7 PRs se muestran en el (Anexo E).

Tabla 20. Resultados de repeticiones para la combinación MS MCS FCFS

Método	Instancia	AUF	Tiempo computacional	Program Makespan	Program Mean flowtime	Program Maximum Lateness	Program Mean lateness	Program Tardiness	Program Maximum tardiness	Program Mean tardiness	Program Number of tardy projects	Program Number of tardy jobs
3 MS MCS FCFS 1	3	3,69356261	6,553	248	5,71666667	201	90,2	27181	201	187,3	10	284
3 MS MCS FCFS 2	3	3,69356261	5,687	243	5,71666667	197	86,1	25948	197	185,4	10	277
3 MS MCS FCFS 3	3	3,69356261	4,875	242	5,71666667	196	85,4	25823	196	183,8	10	288
3 MS MCS FCFS 4	3	3,69356261	4,985	244	5,71666667	196	85,1	25630	196	184,5	10	280
3 MS MCS FCFS 5	3	3,69356261	4,735	249	5,71666667	203	87,9	26529	203	187,9	10	287
3 MS MCS FCFS 6	3	3,69356261	5,265	247	5,71666667	193	88,6	26714	193	187,7	10	289
3 MS MCS FCFS 7	3	3,69356261	5,328	246	5,71666667	198	85,3	25715	198	187,6	10	283
3 MS MCS FCFS 8	3	3,69356261	5,328	243	5,71666667	197	86,1	26032	197	184,3	10	285
3 MS MCS FCFS 9	3	3,69356261	4,922	244	5,71666667	207	85,1	25715	207	188,6	10	279
3 MS MCS FCFS 10	3	3,69356261	4,938	247	5,71666667	193	87,3	26364	193	187,3	10	285
3 MS MCS FCFS 11	3	3,69356261	4,719	245	5,71666667	195	86,7	26181	195	183,2	10	281
3 MS MCS FCFS 12	3	3,69356261	5,006	242	5,71666667	192	86,9	26183	192	180,3	10	284
3 MS MCS FCFS 13	3	3,69356261	4,703	244	5,71666667	200	88	26542	200	187,2	10	284
3 MS MCS FCFS 14	3	3,69356261	4,937	245	5,71666667	192	86,8	26176	192	184,9	10	286
3 MS MCS FCFS 15	3	3,69356261	5,078	250	5,71666667	204	87,3	26291	204	194,5	10	285
3 MS MCS FCFS 16	3	3,69356261	5,328	242	5,71666667	194	86,7	26153	194	181,2	10	287
3 MS MCS FCFS 17	3	3,69356261	5,453	243	5,71666667	196	86,5	26066	196	188,8	10	285
3 MS MCS FCFS 18	3	3,69356261	5,766	245	5,71666667	194	87,3	26335	194	184,4	10	282

Método	Instancia	AUF	Tiempo computacional	Program Makespan	Program Mean flowtime	Program Maximum Lateness	Program Mean lateness	Program Tardiness	Program Maximum tardiness	Program Mean tardiness	Program Number of tardy projects	Program Number of tardy jobs
3 MS MCS FCFS 19	3	3,69356261	4,922	242	5,71666667	195	84,6	25485	195	186,9	10	284
3 MS MCS FCFS 20	3	3,69356261	4,969	245	5,71666667	194	85,8	25915	194	187,6	10	285
3 MS MCS FCFS 21	3	3,69356261	5,25	243	5,71666667	199	87	26276	199	186,6	10	288
3 MS MCS FCFS 22	3	3,69356261	5,094	249	5,71666667	195	87,4	26364	195	186,4	10	286
3 MS MCS FCFS 23	3	3,69356261	5,078	244	5,71666667	196	87,5	26383	196	184,5	10	283
3 MS MCS FCFS 24	3	3,69356261	5,187	241	5,71666667	200	86,2	26024	200	190,5	10	281
3 MS MCS FCFS 25	3	3,69356261	5,188	247	5,71666667	193	89,3	26933	193	188,2	10	286
3 MS MCS FCFS 26	3	3,69356261	5,266	247	5,71666667	191	86,6	26168	191	186,8	10	287
3 MS MCS FCFS 27	3	3,69356261	5,031	246	5,71666667	194	87,4	26363	194	189	10	288
3 MS MCS FCFS 28	3	3,69356261	4,781	247	5,71666667	203	84,7	25585	203	185,6	10	284
3 MS MCS FCFS 29	3	3,69356261	4,593	246	5,71666667	193	87	26228	193	187,6	10	285
3 MS MCS FCFS 30	3	3,69356261	4,812	244	5,71666667	193	86,7	26121	193	184,5	10	282
12 MS MCS FCFS 1	12	3,648533951	10,109	280	5,43333333	241	85,7	51672	241	211,05	20	530
12 MS MCS FCFS 2	12	3,648533951	10,141	279	5,43333333	237	86	51866	237	204,35	20	527
12 MS MCS FCFS 3	12	3,648533951	10,313	271	5,43333333	228	84,3	50888	228	207,1	20	524
12 MS MCS FCFS 4	12	3,648533951	11,188	274	5,43333333	231	85,95	51818	231	210,6	20	515
12 MS MCS FCFS 5	12	3,648533951	11,828	275	5,43333333	232	84,85	51225	232	209,3	20	527

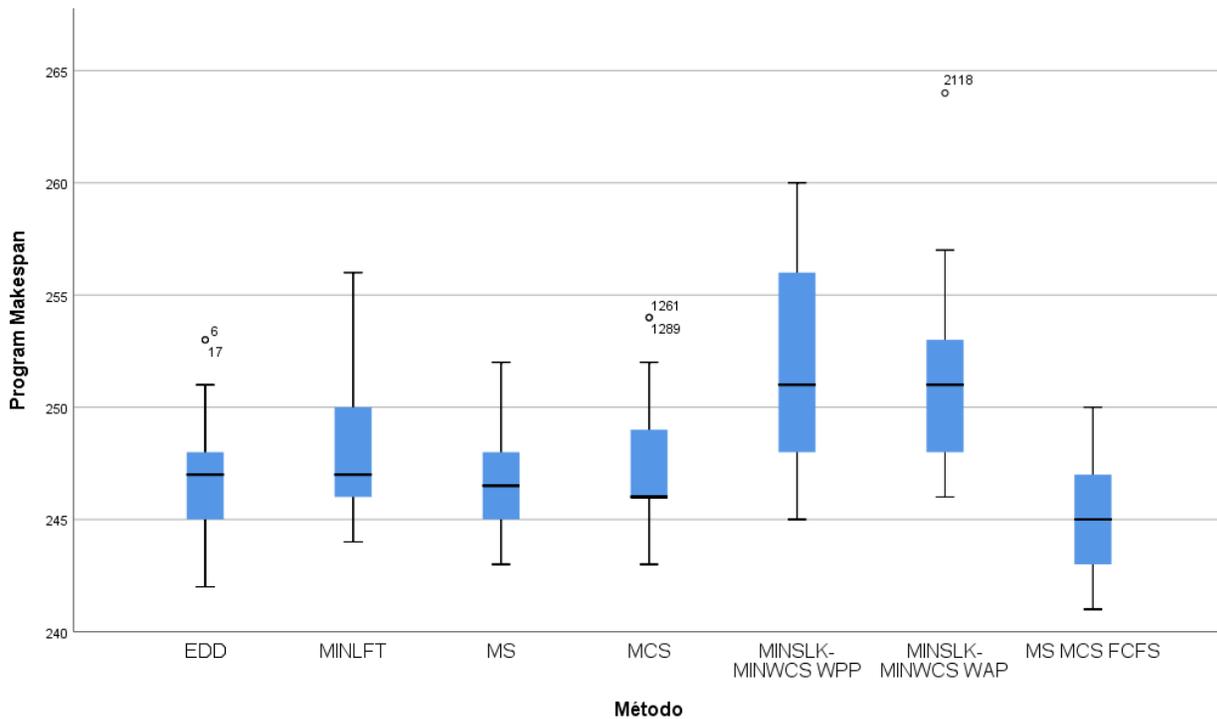
Fuente: Los autores con resultados obtenidos en el *software*

6.6. Análisis estadístico para las mejores reglas o combinaciones

Con los resultados de las repeticiones, se realizó una prueba preliminar con el fin de verificar el cumplimiento de los supuestos del análisis de varianza de un factor, según lo descrito en la metodología. Se verificó que dos de los tres supuestos no se cumplían, en este caso la prueba de normalidad y de homogeneidad de varianzas (homoscedasticidad), por lo tanto se utilizó la prueba de datos no paramétricos Kruskal - Wallis, la cual se describe a continuación:

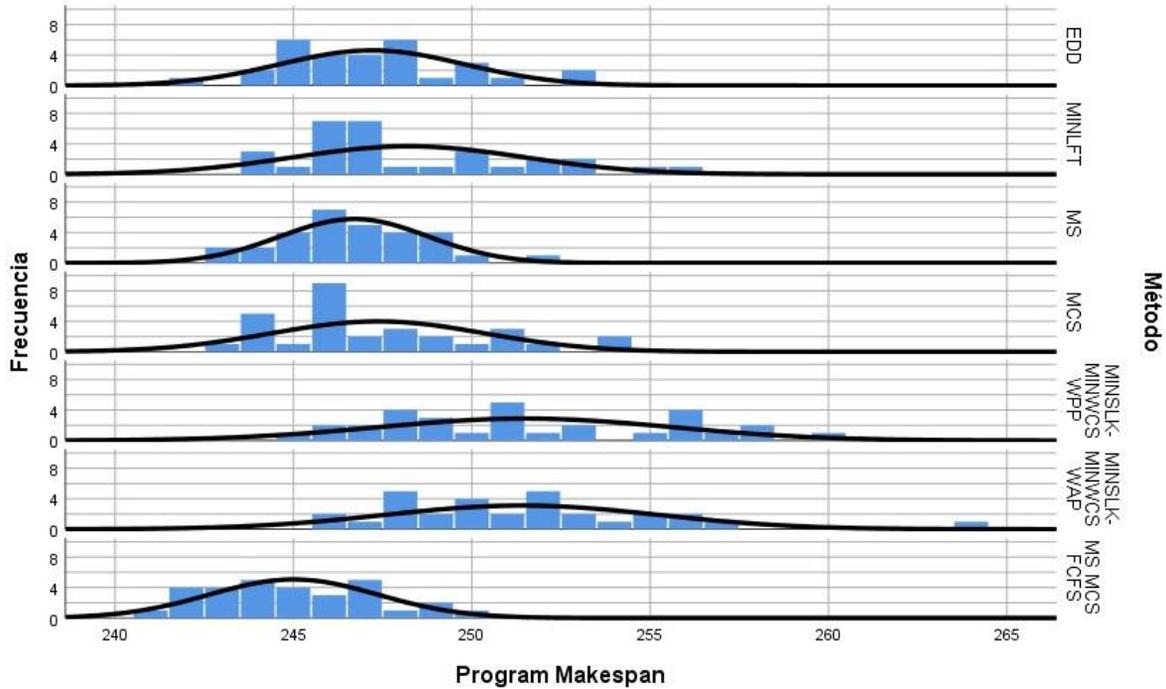
1. En el *software* IBM SPSS se cargaron cada uno de los resultados obtenidos de las repeticiones de las mejores PRs por instancias.
2. Filtrando por la medida de desempeño *Makespan* se generó el *Box Plot (Diagrama de caja y bigotes)* y el histograma de distribución de datos para cada instancia, (para esta descripción se toma como ejemplo la instancia 3) tal como se observa en la **Gráfica 11** y **Gráfica 12**. De este diagrama se observa cuál es la regla o combinación que presenta la menor media de esta medida de desempeño, para este caso es MS MCS FCFS.

Gráfica 11. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 3



Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software* IBM SPSS.

Gráfica 12. Histograma de distribución de datos Instancia 3



Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software IBM SPSS*.

- En la **Tabla 21** se verificó que para la medida de desempeño *Makespan* el “p valor” fuera menor a 0.05, lo que hace que se rechace la hipótesis nula H_0 de igualdad de promedios y en un siguiente paso se comparen los métodos por pares para verificar la hipótesis alternativa H_1 donde por lo menos dos promedios son diferentes.

Tabla 21. Resumen de prueba de hipótesis.

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
3	Las medianas de Program Makespan son las mismas entre las categorías de Método.	Prueba de la mediana para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.
4	La distribución de Program Makespan es la misma entre las categorías de Método.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software IBM SPSS*.

4. Se realizaron las pruebas post-hoc Kruskal-Wallis para las comparaciones entre parejas de métodos para determinar si existen o no entre ellas diferencias significativas, esto a través de la verificación si el valor p es menor a 0.05 en cuyo caso si existe diferencia significativa. Ver **Tabla 22**.

Tabla 22. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 3

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MS	32,300	15,613	2,069	,039	,810
MS MCS FCFS-EDD	41,133	15,613	2,635	,008	,177
MS MCS FCFS-MCS	41,317	15,613	2,646	,008	,171
MS MCS FCFS-MINLFT	56,267	15,613	3,604	,000	,007
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	102,583	15,613	6,570	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	105,567	15,613	6,762	,000	,000
MS-EDD	8,833	15,613	,566	,572	1,000
MS-MCS	-9,017	15,613	-,578	,564	1,000
MS-MINLFT	23,967	15,613	1,535	,125	1,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-70,283	15,613	-4,502	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-73,267	15,613	-4,693	,000	,000
EDD-MCS	-,183	15,613	-,012	,991	1,000
EDD-MINLFT	-15,133	15,613	-,969	,332	1,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-61,450	15,613	-3,936	,000	,002
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-64,433	15,613	-4,127	,000	,001
MCS-MINLFT	14,950	15,613	,958	,338	1,000
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-61,267	15,613	-3,924	,000	,002
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-64,250	15,613	-4,115	,000	,001
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	-46,317	15,613	-2,967	,003	,063
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	-49,300	15,613	-3,158	,002	,033
MINSLK-MINWCS WPP-MINSLK-MINWCS WAP	-2,983	15,613	-,191	,848	1,000

Fuente: Los autores con base en los resultados obtenidos del *software IBM SPSS*.

5. De existir estas diferencias significativas entre las parejas de los métodos se podría determinar una única regla o combinación como la de mejor desempeño. Si no existen diferencias significativas, se infiere que cualquiera de ellas podría elegirse como la mejor.

Para la instancia 3 de acuerdo con la **Gráfica 11** se observa que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron tres combinaciones más que no presentan diferencias significativas con esta: MS, EDD y MCS lo cual se mostró en la **Tabla 22**, lo que significa que para esta instancia las mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS, MS, EDD y MCS**.

A continuación, se presentan los resultados para las 14 instancias, en la forma en que se acaba de describir:

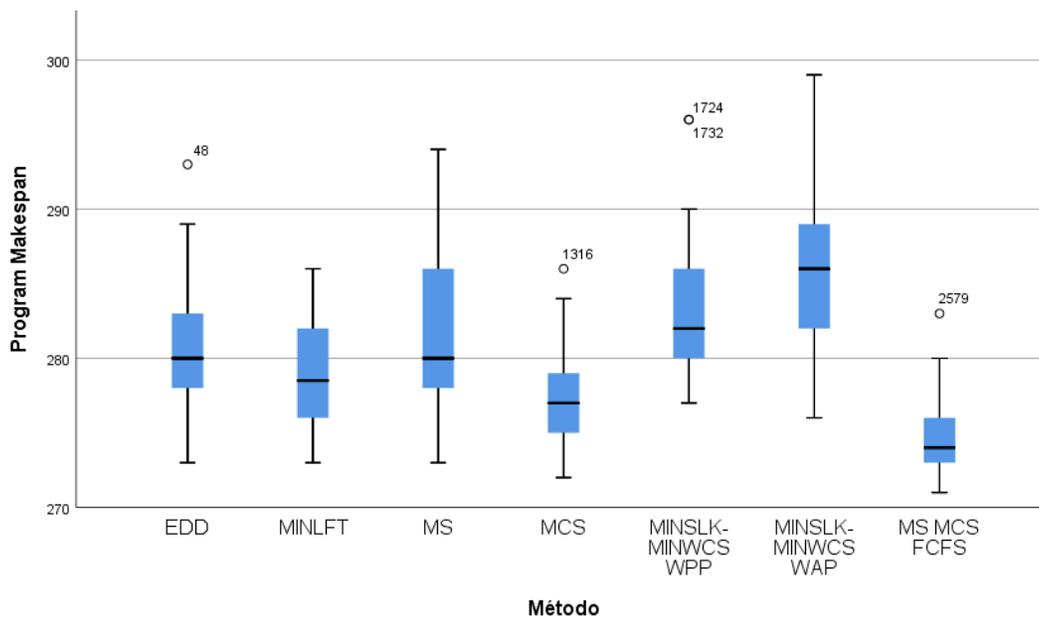
6.6.1. Instancia 3

La descripción de esta instancia es la que se acaba de hacer a manera de ejemplo.

6.6.2. Instancia 12

Para la instancia 12 se observa en la **Gráfica 13** que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis no se encontraron combinaciones o reglas que presentaran diferencias significativas con ésta (Ver **Tabla 23**), por lo tanto, para esta instancia la mejor combinación es **MS MCS FCFS**.

Gráfica 13. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 12



Fuente: Los autores

Tabla 23. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 12

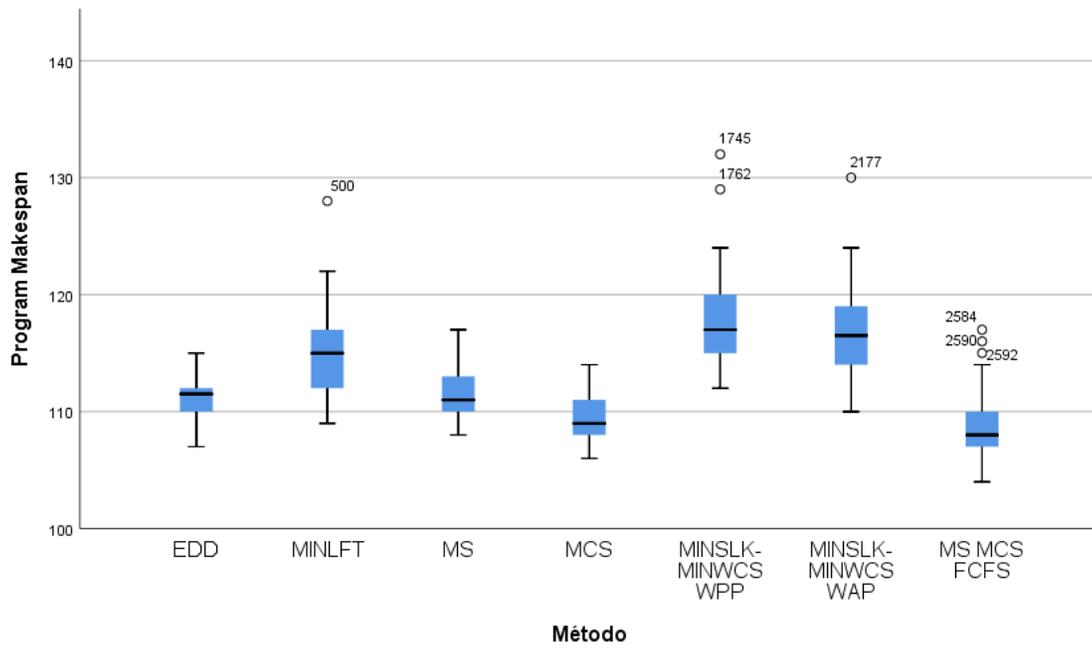
Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	60,000	,000	,000
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	60,000	,000	,000
MINLFT-EDD	60,000	,000	,000
MINLFT-MCS	60,000	,000	,000
MINLFT-MS MCS FCFS	60,000	,000	,000
MINLFT-MS	60,000	,000	,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	2,400	,121	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-EDD	21,600	,000	,000
MINSLK-MINWCS WAP-MCS	38,400	,000	,000
MINSLK-MINWCS WAP-MS MCS FCFS	60,000	,000	,000
MINSLK-MINWCS WAP-MS	60,000	,000	,000
MINSLK-MINWCS WPP-EDD	52,267	,000	,000
MINSLK-MINWCS WPP-MCS	60,000	,000	,000
MINSLK-MINWCS WPP-MS MCS FCFS	60,000	,000	,000
MINSLK-MINWCS WPP-MS	60,000	,000	,000
EDD-MCS	13,067	,000	,006
EDD-MS MCS FCFS	60,000	,000	,000
EDD-MS	60,000	,000	,000
MCS-MS MCS FCFS	52,267	,000	,000
MCS-MS	60,000	,000	,000
MS MCS FCFS-MS	60,000	,000	,000

Fuente: Los autores

6.6.3. Instancia 24

Para la instancia 24 se observa en la **Gráfica 14** que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en *Makespan* ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron tres combinaciones más que no presentan diferencias significativas con esta: MS, EDD y MCS lo cual se muestra a continuación en la **Tabla 24**, lo que significa que para esta instancia las mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS, MS, EDD y MCS.**

Gráfica 14. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 24



Fuente: Los autores

Tabla 24. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 24

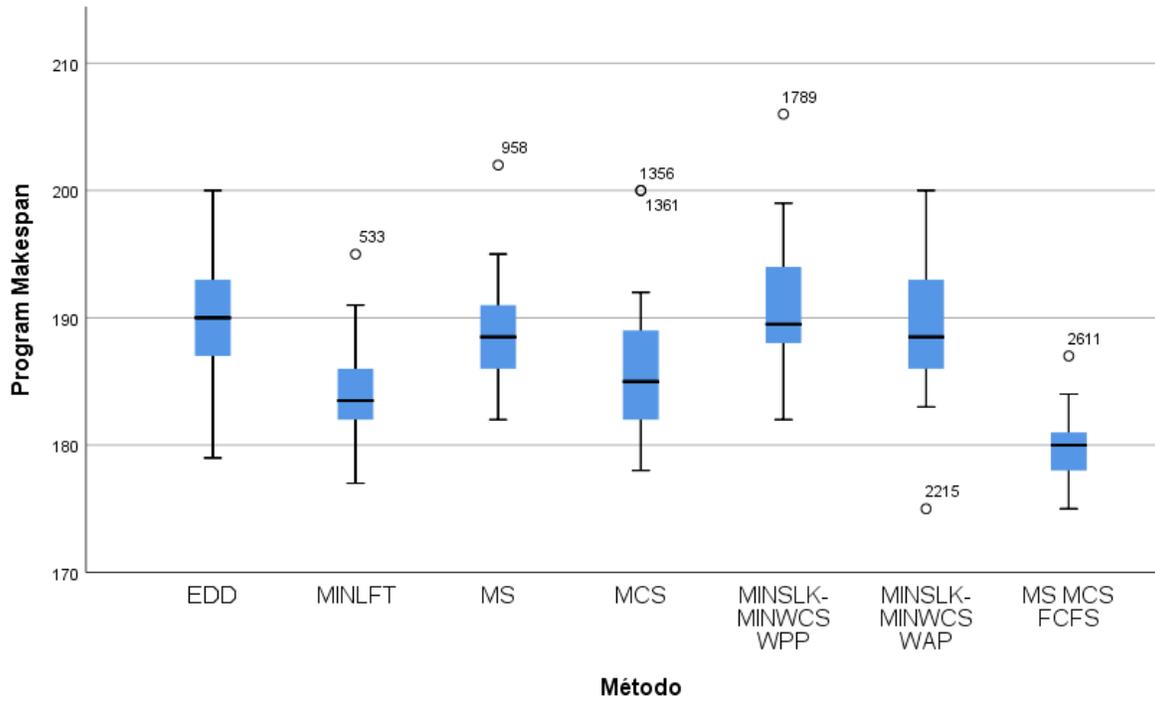
Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MCS	3,083	15,646	,197	,844	1,000
MS MCS FCFS-EDD	32,483	15,646	2,076	,038	,795
MS MCS FCFS-MS	37,433	15,646	2,393	,017	,351
MS MCS FCFS-MINLFT	84,450	15,646	5,398	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	109,017	15,646	6,968	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	119,467	15,646	7,636	,000	,000
MCS-EDD	29,400	15,646	1,879	,060	1,000
MCS-MS	34,350	15,646	2,195	,028	,591
MCS-MINLFT	81,367	15,646	5,201	,000	,000
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-105,933	15,646	-6,771	,000	,000
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-116,383	15,646	-7,439	,000	,000
EDD-MS	-4,950	15,646	-,316	,752	1,000
EDD-MINLFT	-51,967	15,646	-3,321	,001	,019
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-76,533	15,646	-4,892	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-86,983	15,646	-5,559	,000	,000
MS-MINLFT	47,017	15,646	3,005	,003	,056
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-71,583	15,646	-4,575	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-82,033	15,646	-5,243	,000	,000
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	-24,567	15,646	-1,570	,116	1,000
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	-35,017	15,646	-2,238	,025	,530
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	10,450	15,646	,668	,504	1,000

Fuente: Los autores

6.6.4. Instancia 34

Para la instancia 34 se observa en la **Gráfica 15** que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis no se encontraron combinaciones o reglas que presentaran diferencias significativas con ésta (Ver **Tabla 25**), por lo tanto, para esta instancia la mejor combinación es **MS MCS FCFS**.

Gráfica 15. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 34



Fuente: Los autores

Tabla 25. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 34

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MINLFT	17,067	,000	,001
MS MCS FCFS-MCS	13,611	,000	,005
MS MCS FCFS-MS	42,088	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	32,411	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	48,654	,000	,000
MS MCS FCFS-EDD	48,654	,000	,000
MINLFT-MCS	,601	,438	1,000
MINLFT-MS	9,774	,002	,037
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	13,125	,000	,006
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	21,600	,000	,000
MINLFT-EDD	11,589	,001	,014
MCS-MS	6,696	,010	,203
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	9,600	,002	,041
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	13,067	,000	,006
MCS-EDD	8,148	,004	,091
MS-MINSLK-MINWCS WAP	,000	1,000	1,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	,606	,436	1,000
MS-EDD	1,669	,196	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	,067	,796	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-EDD	,067	,795	1,000
MINSLK-MINWCS WPP-EDD	,000	1,000	1,000

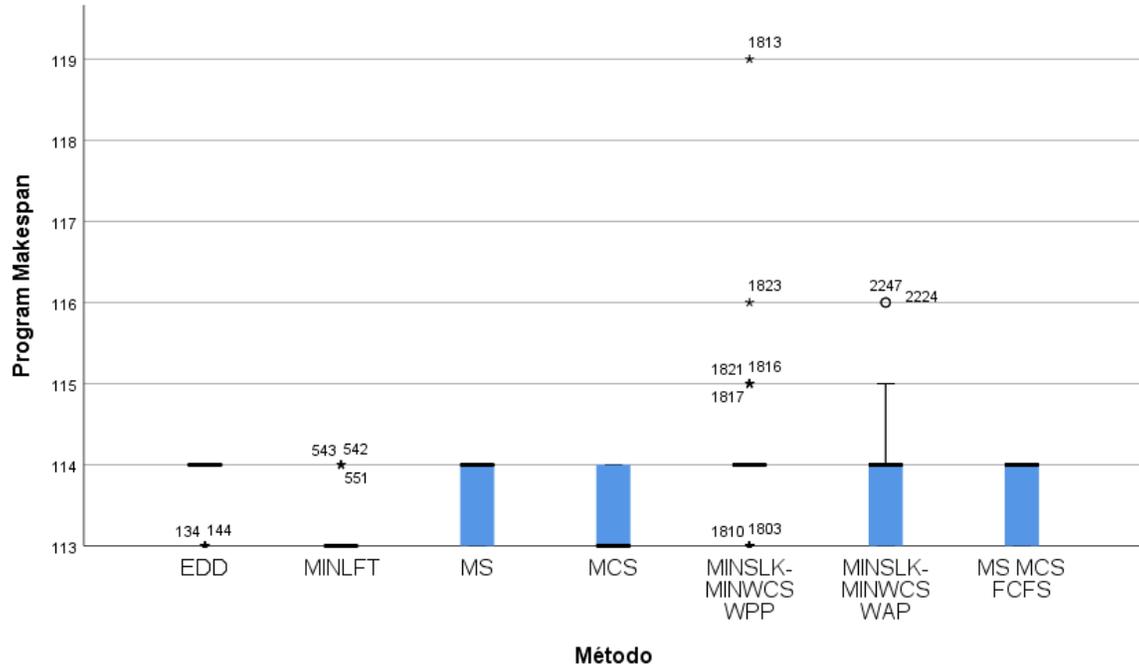
Fuente: Los autores

6.6.5. Instancia 38

Para la instancia 38 se observa en la **Gráfica 16** que hay dos combinaciones que presentan el mejor desempeño en *Makespan* ya que tienen las medias más bajas y son: MCS y MINLFT, sin embargo al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontró que no presentan diferencias significativas con: MS MCS FCFS, MS y MINSLK-MINWCS WAP

lo cual se muestra a continuación en la **Tabla 26**, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MCS, MINLFT, MS MCS FCFS, MS y MINSLK-MINWCS WAP.**

Gráfica 16. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 38



Fuente: Los autores

Tabla 26. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 38

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MINLFT	17,067	,000	,001
MS MCS FCFS-MCS	13,611	,000	,005
MS MCS FCFS-MS	42,088	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	32,411	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	48,654	,000	,000
MS MCS FCFS-EDD	48,654	,000	,000
MINLFT-MCS	,601	,438	1,000
MINLFT-MS	9,774	,002	,037
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	13,125	,000	,006
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	21,600	,000	,000
MINLFT-EDD	11,589	,001	,014
MCS-MS	6,696	,010	,203
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	9,600	,002	,041
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	13,067	,000	,006
MCS-EDD	8,148	,004	,091
MS-MINSLK-MINWCS WAP	,000	1,000	1,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	,606	,436	1,000
MS-EDD	1,669	,196	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	,067	,796	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-EDD	,067	,795	1,000
MINSLK-MINWCS WPP-EDD	,000	1,000	1,000

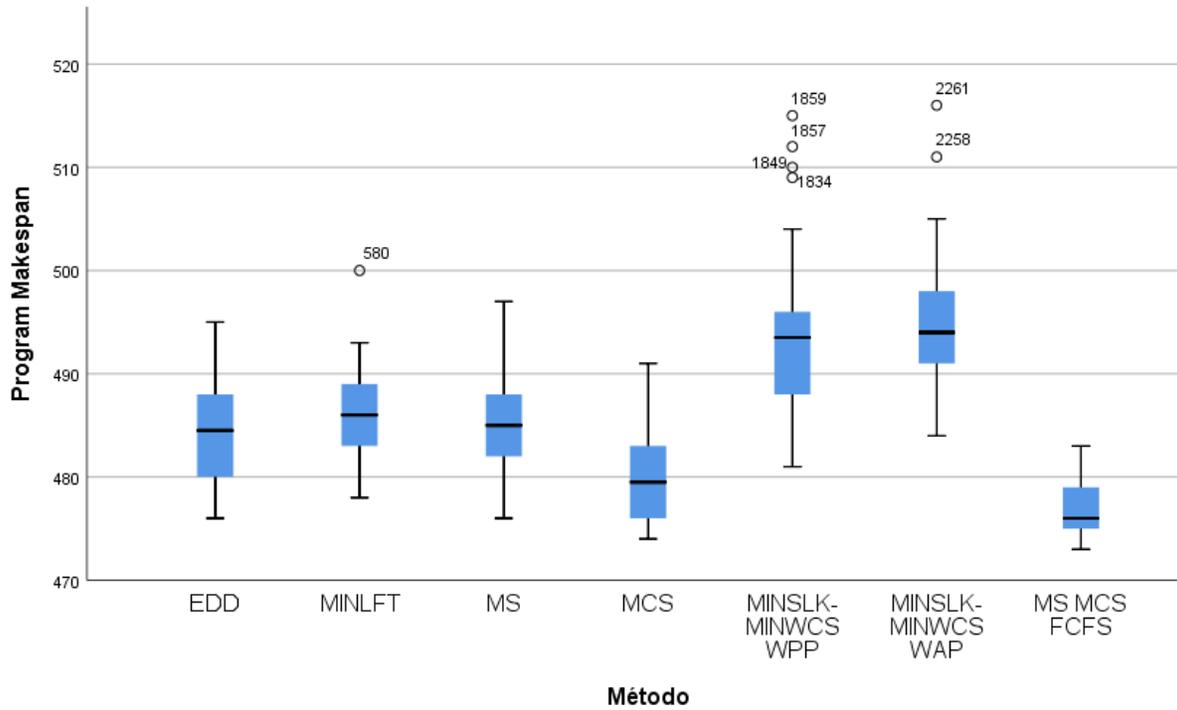
Fuente: Los autores

6.6.6. Instancia 45

Para la instancia 45 se observa en la **Gráfica 17** que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontró una combinación más que no presenta diferencias significativas con esta: MCS lo cual se muestra a continuación en la **Tabla**

27, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS y MCS.**

Gráfica 17. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 45



Fuente: Los autores

Tabla 27. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 45

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MINLFT	17,067	,000	,001
MS MCS FCFS-MCS	13,611	,000	,005
MS MCS FCFS-MS	42,088	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	32,411	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	48,654	,000	,000
MS MCS FCFS-EDD	48,654	,000	,000
MINLFT-MCS	,601	,438	1,000
MINLFT-MS	9,774	,002	,037
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	13,125	,000	,006
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	21,600	,000	,000
MINLFT-EDD	11,589	,001	,014
MCS-MS	6,696	,010	,203
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	9,600	,002	,041
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	13,067	,000	,006
MCS-EDD	8,148	,004	,091
MS-MINSLK-MINWCS WAP	,000	1,000	1,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	,606	,436	1,000
MS-EDD	1,669	,196	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	,067	,796	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-EDD	,067	,795	1,000
MINSLK-MINWCS WPP-EDD	,000	1,000	1,000

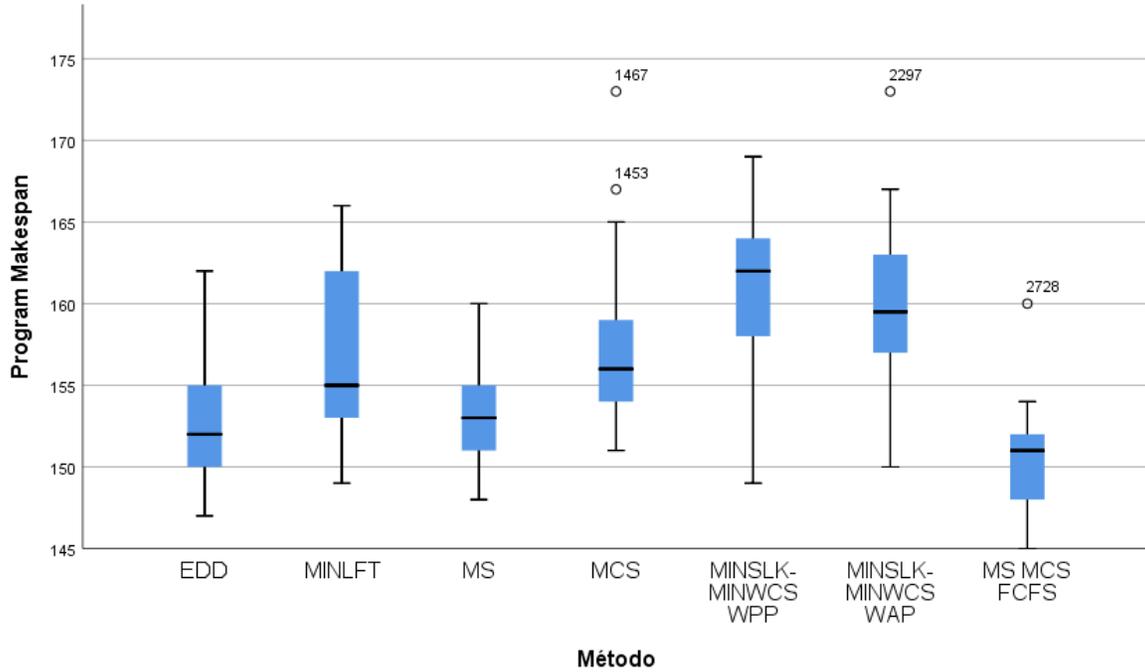
Fuente: Los autores

6.6.7. Instancia 49

Para la instancia 49 se observa en la **Gráfica 18** que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron dos combinaciones más que no presenta diferencias significativas con esta: MS y EDD lo cual se muestra a continuación

en la **Tabla 28**, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS, MS y EDD**.

Gráfica 18. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 49



Fuente: Los autores

Tabla 28. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 49

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-EDD	28,067	15,660	1,792	,073	1,000
MS MCS FCFS-MS	33,783	15,660	2,157	,031	,651
MS MCS FCFS-MINLFT	73,967	15,660	4,723	,000	,000
MS MCS FCFS-MCS	79,783	15,660	5,095	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	111,183	15,660	7,100	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	120,050	15,660	7,666	,000	,000
EDD-MS	-5,717	15,660	-,365	,715	1,000
EDD-MINLFT	-45,900	15,660	-2,931	,003	,071
EDD-MCS	-51,717	15,660	-3,302	,001	,020
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-83,117	15,660	-5,307	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-91,983	15,660	-5,874	,000	,000
MS-MINLFT	40,183	15,660	2,566	,010	,216
MS-MCS	-46,000	15,660	-2,937	,003	,070
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-77,400	15,660	-4,942	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-86,267	15,660	-5,509	,000	,000
MINLFT-MCS	-5,817	15,660	-,371	,710	1,000
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	-37,217	15,660	-2,376	,017	,367
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	-46,083	15,660	-2,943	,003	,068
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-31,400	15,660	-2,005	,045	,944
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-40,267	15,660	-2,571	,010	,213
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	8,867	15,660	,566	,571	1,000

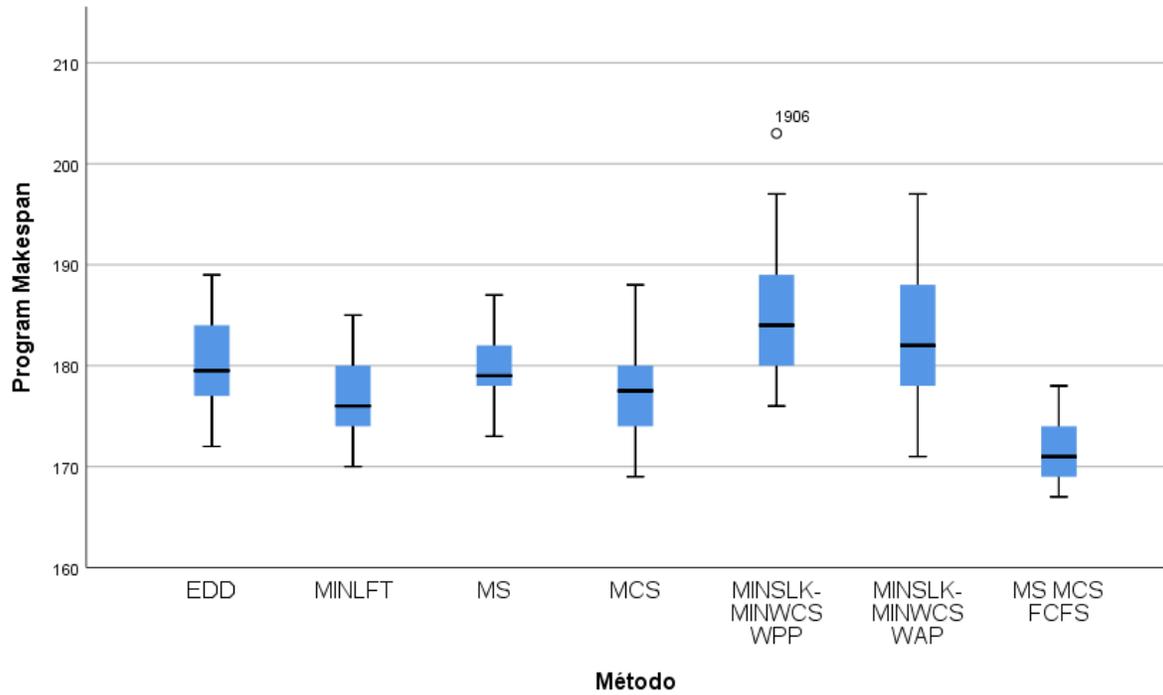
Fuente: Los autores

6.6.8. Instancia 53

Para la instancia 53 se observa en la **Gráfica 19** que la combinación **MS MCS FCFS** presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, y al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontró que tiene diferencias significativas con las demás PRs

por lo que se concluye que esta es la de mejor desempeño para esta instancia, tal como se observa en la **Tabla 29**.

Gráfica 19. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 53



Fuente: Los autores

Tabla 29. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 53

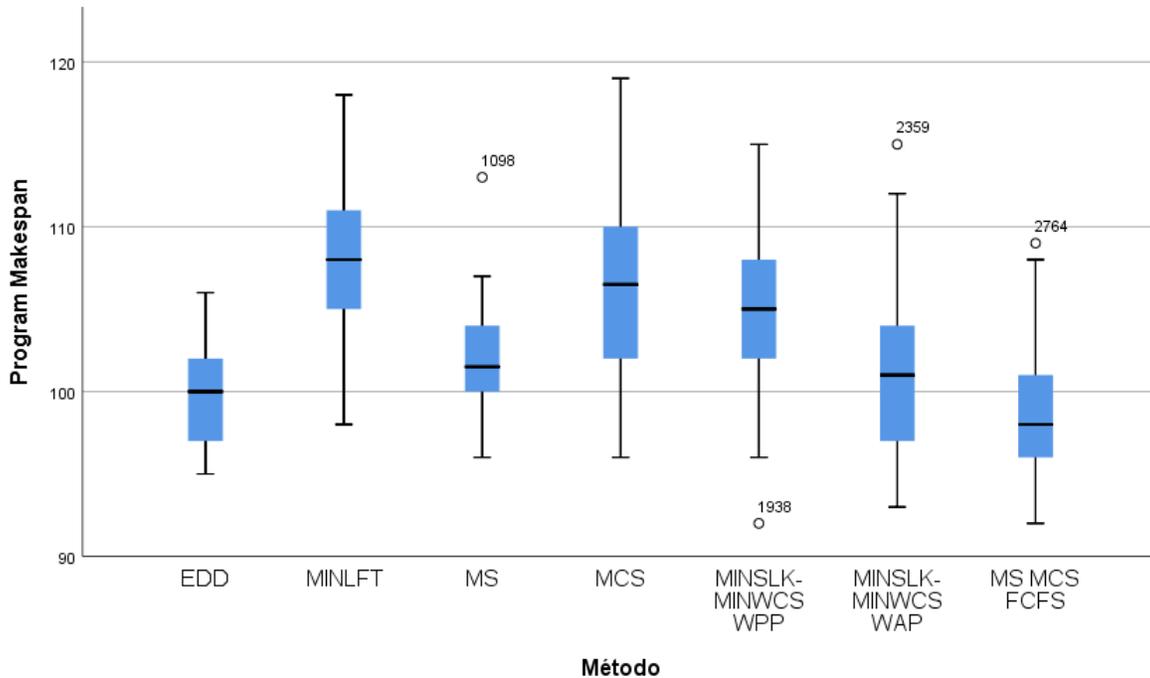
Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MINLFT	54,067	15,667	3,451	,001	,012
MS MCS FCFS-MCS	58,833	15,667	3,755	,000	,004
MS MCS FCFS-EDD	91,100	15,667	5,815	,000	,000
MS MCS FCFS-MS	91,117	15,667	5,816	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	113,333	15,667	7,234	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	131,483	15,667	8,392	,000	,000
MINLFT-MCS	-4,767	15,667	-,304	,761	1,000
MINLFT-EDD	37,033	15,667	2,364	,018	,380
MINLFT-MS	-37,050	15,667	-2,365	,018	,379
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	-59,267	15,667	-3,783	,000	,003
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	-77,417	15,667	-4,941	,000	,000
MCS-EDD	32,267	15,667	2,059	,039	,828
MCS-MS	32,283	15,667	2,061	,039	,826
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-54,500	15,667	-3,479	,001	,011
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-72,650	15,667	-4,637	,000	,000
EDD-MS	-,017	15,667	-,001	,999	1,000
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-22,233	15,667	-1,419	,156	1,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-40,383	15,667	-2,578	,010	,209
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-22,217	15,667	-1,418	,156	1,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-40,367	15,667	-2,576	,010	,210
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	18,150	15,667	1,158	,247	1,000

Fuente: Los autores

6.6.9. Instancia 57

Para la instancia 57 se observa en la **Gráfica 20** que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron tres combinaciones más que no presentan diferencias significativas con esta: EDD, MINSLK-MINWCS, MS lo cual se muestra a continuación en la **Tabla 29**, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS, EDD, MINSLK-MINWCS, MCS.**

Gráfica 20. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 57



Fuente: Los autores

Tabla 30. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 57

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-EDD	12,350	15,662	,789	,430	1,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	33,567	15,662	2,143	,032	,674
MS MCS FCFS-MS	38,517	15,662	2,459	,014	,292
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	68,100	15,662	4,348	,000	,000
MS MCS FCFS-MCS	68,550	15,662	5,654	,000	,000
MS MCS FCFS-MINLFT	106,350	15,662	6,790	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-21,217	15,662	-1,355	,176	1,000
EDD-MS	-26,167	15,662	-1,671	,095	1,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-55,750	15,662	-3,560	,000	,008
EDD-MCS	-76,200	15,662	-4,865	,000	,000
EDD-MINLFT	-94,000	15,662	-6,002	,000	,000
MINSLK-MINWCS WAP-MS	4,950	15,662	,316	,752	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	34,533	15,662	2,205	,027	,577
MINSLK-MINWCS WAP-MCS	54,983	15,662	3,511	,000	,009
MINSLK-MINWCS WAP-MINLFT	72,783	15,662	4,647	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-29,583	15,662	-1,889	,059	1,000
MS-MCS	-50,033	15,662	-3,195	,001	,029
MS-MINLFT	67,833	15,662	4,331	,000	,000
MINSLK-MINWCS WPP-MCS	20,450	15,662	1,306	,192	1,000
MINSLK-MINWCS WPP-MINLFT	38,250	15,662	2,442	,015	,307
MCS-MINLFT	17,800	15,662	1,137	,256	1,000

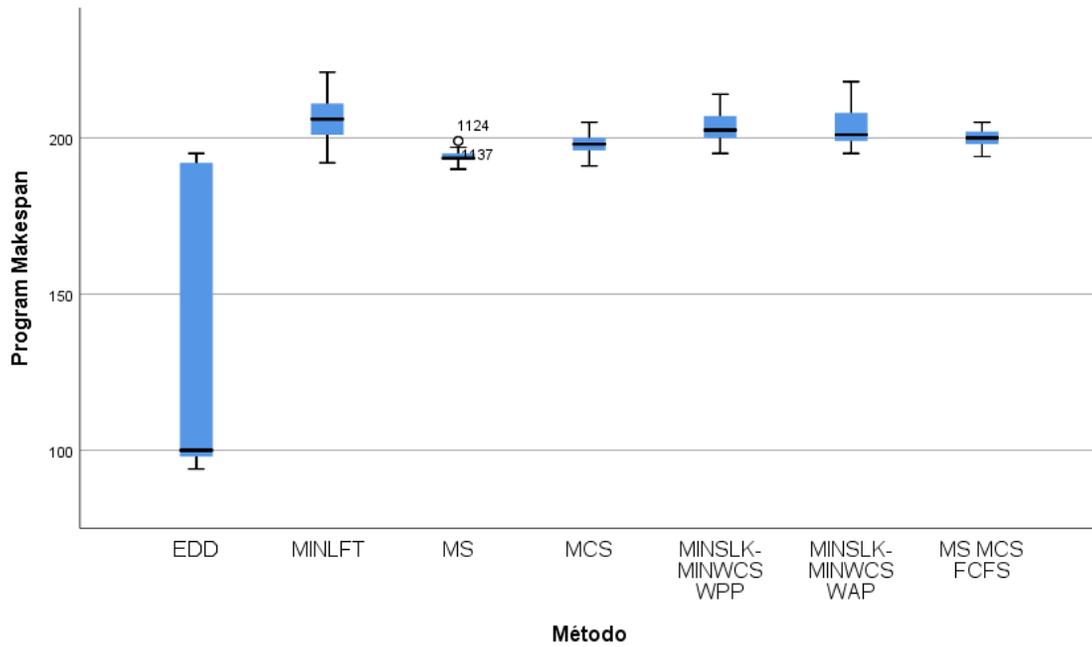
Fuente: Los autores

6.6.10. Instancia 59

Para la instancia 59 se observa en la **Gráfica 21** que la combinación EDD presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontró una que la PR MS no presento diferencias

significativas con esta, lo cual se muestra a continuación en la **Tabla 29**, lo que significa que para esta instancia las mejores combinaciones o PRs son: **MS y EDD**.

Gráfica 21. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 59



Fuente: Los autores

Tabla 31. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 59

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
EDD-MS	-31,100	15,669	-1,985	,047	,990
EDD-MCS	-72,500	15,669	-4,627	,000	,000
EDD-MS MCS FCFS	-100,200	15,669	-6,395	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-121,550	15,669	-7,757	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-125,050	15,669	-7,981	,000	,000
EDD-MINLFT	-139,350	15,669	-8,893	,000	,000
MS-MCS	-41,400	15,669	-2,642	,008	,173
MS-MS MCS FCFS	-69,100	15,669	-4,410	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-90,450	15,669	-5,773	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-93,950	15,669	-5,996	,000	,000
MS-MINLFT	108,250	15,669	6,909	,000	,000
MCS-MS MCS FCFS	-27,700	15,669	-1,768	,077	1,000
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-49,050	15,669	-3,130	,002	,037
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-52,550	15,669	-3,354	,001	,017
MCS-MINLFT	66,850	15,669	4,266	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	21,350	15,669	1,363	,173	1,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	24,850	15,669	1,586	,113	1,000
MS MCS FCFS-MINLFT	39,150	15,669	2,499	,012	,262
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	3,500	15,669	,223	,823	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINLFT	17,800	15,669	1,136	,256	1,000
MINSLK-MINWCS WPP-MINLFT	14,300	15,669	,913	,361	1,000

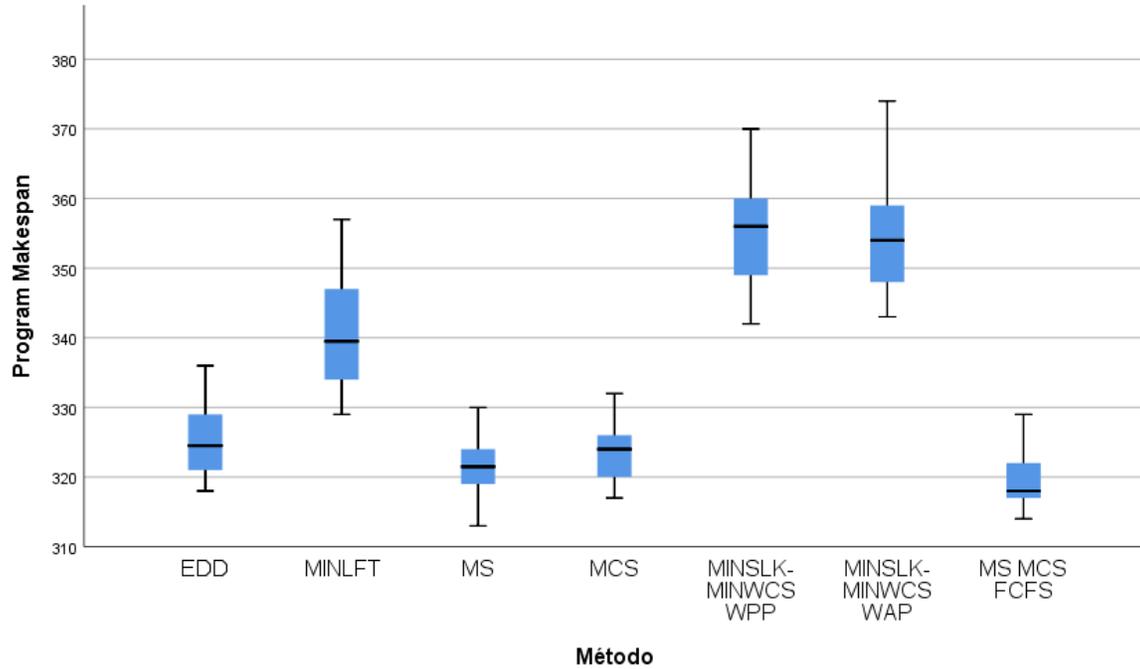
Fuente: Los autores

6.6.11. Instancia 99

Para la instancia 99 se observa en la **Gráfica 22** que la combinación MS MCS FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron tres combinaciones más que no presentan diferencias significativas con esta: MS, MCS y EDD lo cual se muestra a

continuación en la **Tabla 32**, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS, MS, MCS y EDD**.

Gráfica 22. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 99



Fuente: Los autores

Tabla 32. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 99

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MS	19,600	15,682	1,250	,211	1,000
MS MCS FCFS-MCS	33,617	15,682	2,144	,032	,673
MS MCS FCFS-EDD	44,017	15,682	2,807	,005	,105
MS MCS FCFS-MINLFT	104,083	15,682	6,637	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	139,467	15,682	8,894	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	142,333	15,682	9,076	,000	,000
MS-MCS	-14,017	15,682	-,894	,371	1,000
MS-EDD	24,417	15,682	1,557	,119	1,000
MS-MINLFT	84,483	15,682	5,387	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-119,867	15,682	-7,844	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-122,733	15,682	-7,827	,000	,000
MCS-EDD	10,400	15,682	,863	,507	1,000
MCS-MINLFT	70,467	15,682	4,494	,000	,000
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-105,850	15,682	-6,750	,000	,000
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-108,717	15,682	-6,933	,000	,000
EDD-MINLFT	-60,067	15,682	-3,830	,000	,003
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-95,450	15,682	-6,087	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-98,317	15,682	-6,269	,000	,000
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	-35,383	15,682	-2,256	,024	,505
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	-38,250	15,682	-2,439	,015	,309
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	2,867	15,682	,183	,855	1,000

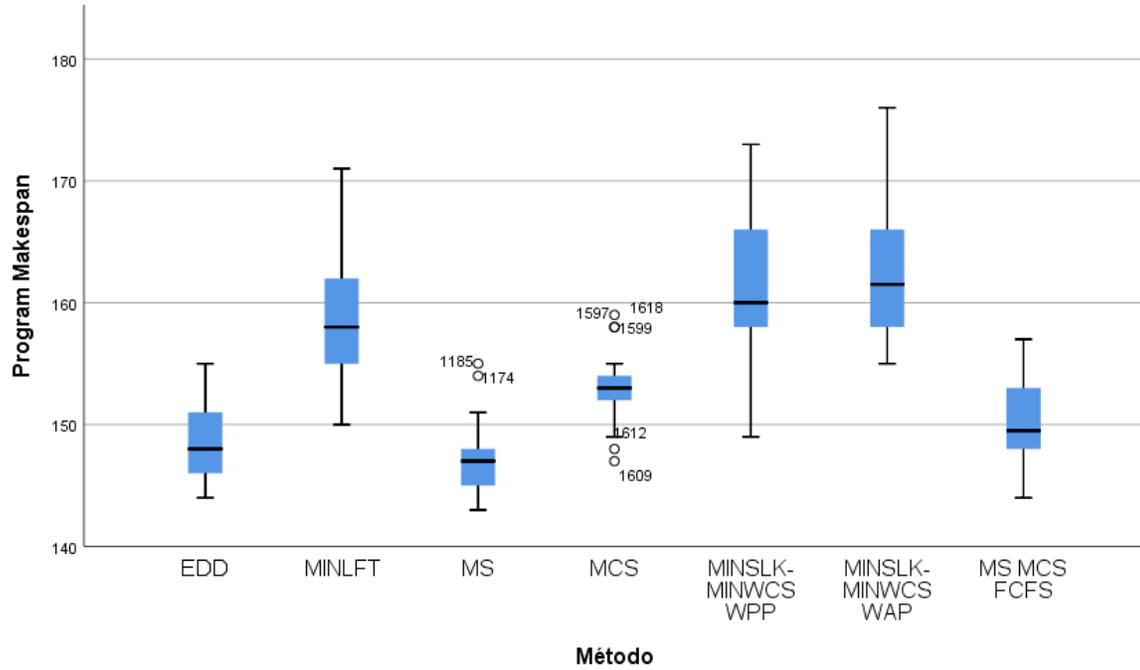
Fuente: Los autores

6.6.12. Instancia 108

Para la instancia 108 se observa en la **Gráfica 23** que la combinación MS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron tres combinaciones más que no presentan

diferencias significativas con esta: MS, EDD y MS MCS FCFS lo cual se muestra a continuación en la **Tabla 33**, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS, MS, MCS y EDD**.

Gráfica 23. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 108



Fuente: Los autores

Tabla 33. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 108

Muestra 1 Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS-EDD	14,667	15,672	,936	,349	1,000
MS-MS MCS FCFS	-33,633	15,672	-2,146	,032	,669
MS-MCS	-59,100	15,672	-3,771	,000	,003
MS-MINLFT	108,183	15,672	6,903	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-126,900	15,672	-8,097	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-133,983	15,672	-8,549	,000	,000
EDD-MS MCS FCFS	-18,967	15,672	-1,210	,226	1,000
EDD-MCS	-44,433	15,672	-2,835	,005	,096
EDD-MINLFT	-93,517	15,672	-5,967	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-112,233	15,672	-7,161	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-119,317	15,672	-7,613	,000	,000
MS MCS FCFS-MCS	25,467	15,672	1,625	,104	1,000
MS MCS FCFS-MINLFT	74,550	15,672	4,757	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	93,267	15,672	5,951	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	100,350	15,672	6,403	,000	,000
MCS-MINLFT	49,083	15,672	3,132	,002	,036
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-67,800	15,672	-4,326	,000	,000
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-74,883	15,672	-4,778	,000	,000
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	-18,717	15,672	-1,194	,232	1,000
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	-25,800	15,672	-1,646	,100	1,000
MINSLK-MINWCS WPP-MINSLK-MINWCS WAP	-7,083	15,672	-,452	,651	1,000

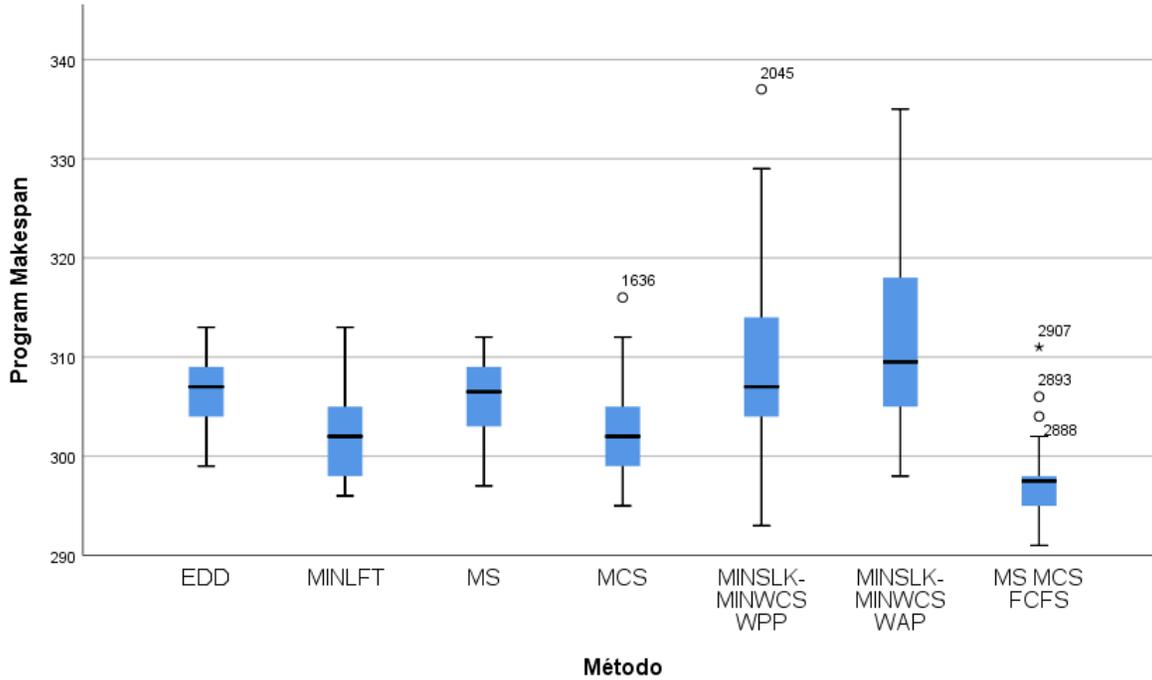
Fuente: Los autores

6.6.13. Instancia 113

Para la instancia 113 se observa en la **Gráfica 24** que la combinación MS-MCS-FCFS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron tres combinaciones más que no presentan diferencias significativas con esta: MCS, MINLFT lo cual se muestra a

continuación en la **Tabla 34**, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MS MCS FCFS, MCS, MINLFT**.

Gráfica 24. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 113



Fuente: Los autores

Tabla 34. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 113

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS MCS FCFS-MCS	45,350	15,667	2,895	,004	,080
MS MCS FCFS-MINLFT	46,400	15,667	2,962	,003	,064
MS MCS FCFS-MS	85,900	15,667	5,483	,000	,000
MS MCS FCFS-EDD	91,900	15,667	5,866	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	103,267	15,667	6,591	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	118,933	15,667	7,591	,000	,000
MCS-MINLFT	1,050	15,667	,067	,947	1,000
MCS-MS	40,550	15,667	2,588	,010	,203
MCS-EDD	46,550	15,667	2,971	,003	,062
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-57,917	15,667	-3,697	,000	,005
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-73,583	15,667	-4,697	,000	,000
MINLFT-MS	-39,500	15,667	-2,521	,012	,246
MINLFT-EDD	45,500	15,667	2,904	,004	,077
MINLFT-MINSLK-MINWCS WPP	-56,867	15,667	-3,630	,000	,006
MINLFT-MINSLK-MINWCS WAP	-72,533	15,667	-4,630	,000	,000
MS-EDD	6,000	15,667	,383	,702	1,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-17,367	15,667	-1,108	,268	1,000
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-33,033	15,667	-2,108	,035	,735
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-11,367	15,667	-,726	,468	1,000
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-27,033	15,667	-1,725	,084	1,000
MINSLK-MINWCS WPP-MINSLK-MINWCS WAP	-15,667	15,667	-1,000	,317	1,000

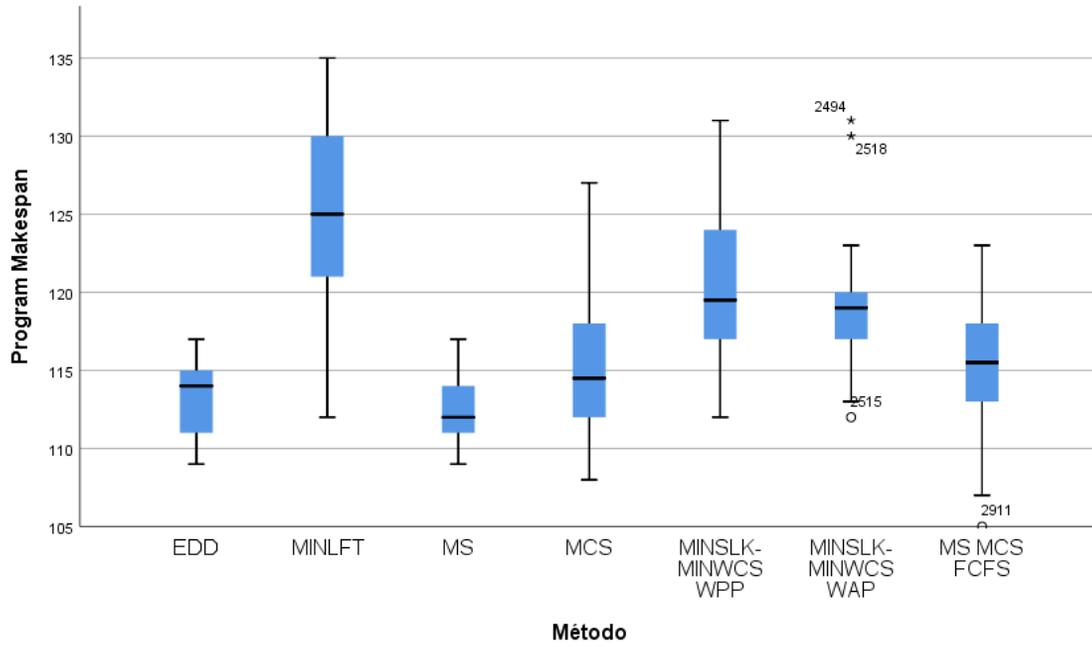
Fuente: Los autores

6.6.14. Instancia 128

Para la instancia 128 se observa en la **Gráfica 25** que la combinación MS presenta el mejor desempeño en Makespan ya que tiene la menor media, sin embargo, al aplicar la prueba Kruskal-Wallis se encontraron tres combinaciones más que no presentan diferencias significativas con esta: MCS, EDD y MS-MCS-FCFS lo cual se muestra a

continuación en la **Tabla 35**, lo que significa que para esta instancia los mejores combinaciones o PRs son: **MS, EDD y MS MCS FCFS**.

Gráfica 25. Diagrama de Caja y Bigotes Instancia No. 128



Fuente: Los autores

Tabla 35. Comparaciones entre parejas de Método para la instancia No. 128

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de contraste	Error Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. ajust.
MS-EDD	13,117	15,661	,838	,402	1,000
MS-MCS	-33,517	15,661	-2,140	,032	,679
MS-MS MCS FCFS	-41,083	15,661	-2,623	,009	,183
MS-MINSLK-MINWCS WAP	-82,767	15,661	-5,285	,000	,000
MS-MINSLK-MINWCS WPP	-91,817	15,661	-5,863	,000	,000
MS-MINLFT	125,383	15,661	8,006	,000	,000
EDD-MCS	-20,400	15,661	-1,303	,193	1,000
EDD-MS MCS FCFS	-27,967	15,661	-1,786	,074	1,000
EDD-MINSLK-MINWCS WAP	-69,650	15,661	-4,447	,000	,000
EDD-MINSLK-MINWCS WPP	-78,700	15,661	-5,025	,000	,000
EDD-MINLFT	-112,267	15,661	-7,169	,000	,000
MCS-MS MCS FCFS	-7,567	15,661	-,483	,629	1,000
MCS-MINSLK-MINWCS WAP	-49,250	15,661	-3,145	,002	,035
MCS-MINSLK-MINWCS WPP	-58,300	15,661	-3,723	,000	,004
MCS-MINLFT	91,867	15,661	5,866	,000	,000
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WAP	41,683	15,661	2,662	,008	,163
MS MCS FCFS-MINSLK-MINWCS WPP	50,733	15,661	3,239	,001	,025
MS MCS FCFS-MINLFT	84,300	15,661	5,383	,000	,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINSLK-MINWCS WPP	9,050	15,661	,578	,563	1,000
MINSLK-MINWCS WAP-MINLFT	42,617	15,661	2,721	,007	,137
MINSLK-MINWCS WPP-MINLFT	33,567	15,661	2,143	,032	,674

Fuente: Los autores

A continuación, se presentan las mejores PRs para cada instancia. (Ver **Tabla 36**).

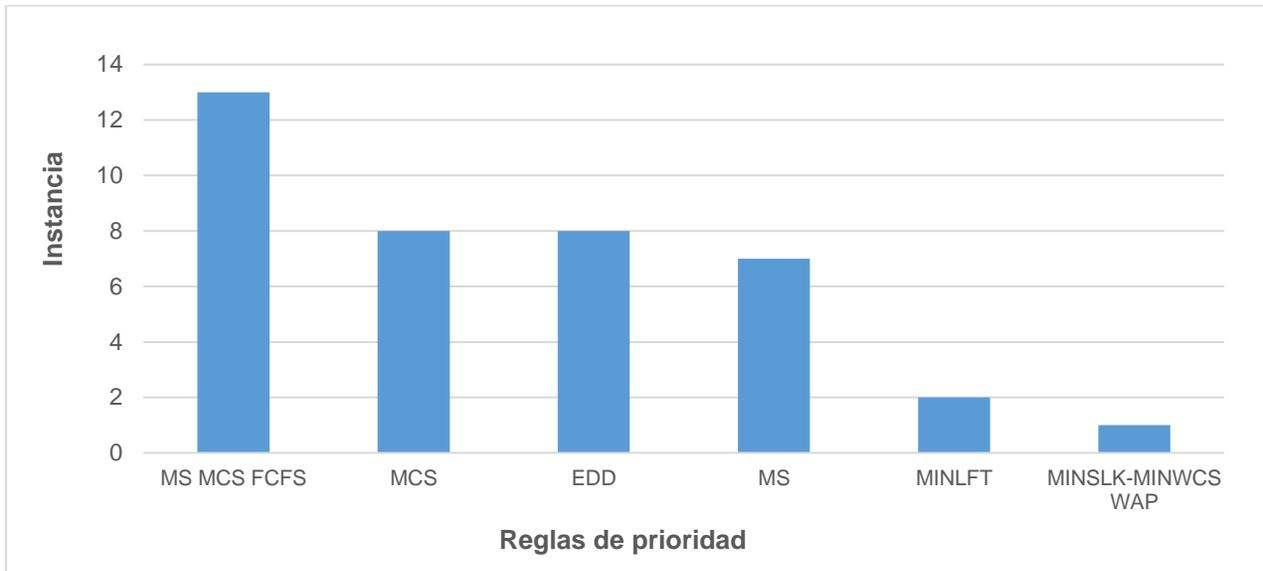
Tabla 36. Mejores reglas de prioridad por instancia

INSTANCIA	REGLA DE PRIORIDAD
3	MS MCS FCFS, MS, EDD y MCS
12	MS MCS FCFS
24	MS MCS FCFS, MS, EDD y MCS
34	MS MCS FCFS
38	MCS, MINLFT, MS MCS FCFS, MS y MINSLK-MINWCS WAP
45	MS MCS FCFS y MCS
49	MS MCS FCFS, MS y EDD
53	MS MCS FCFS
57	MS MCS FCFS, EDD, MINSLK-MINWCS, MCS
59	MS, EDD
99	MS MCS FCFS, MS, MCS, EDD
108	MS MCS FCFS, MS, MCS, EDD
113	MS MCS FCFS, MCS, MINLFT
128	MS, EDD y MS MCS FCFS.

Fuente: Los autores

En la **Gráfica 26** se muestra cuáles son las mejores PRs en términos de cuántas veces aparecen como la mejor solución en las 14 instancias.

Gráfica 26. Frecuencia de las mejores reglas de prioridad en las instancias



Fuente: Los autores

Se puede observar que las mejores PRs en su orden son: **MS MCS FCFS, MCS, EDD, MS, MINLFT, MINSLK-MINWCS WAP, MINSLK-MINWCS WPP**. Además, entre las 7 mejores, la que mejor desempeño tiene es: **MS MCS FCFS**.

6.7. Descripción del método heurístico propuesto

Teniendo en cuenta las mejores reglas o combinaciones obtenidas, se presentan a continuación los pasos a seguir para la implementación de las mismas.

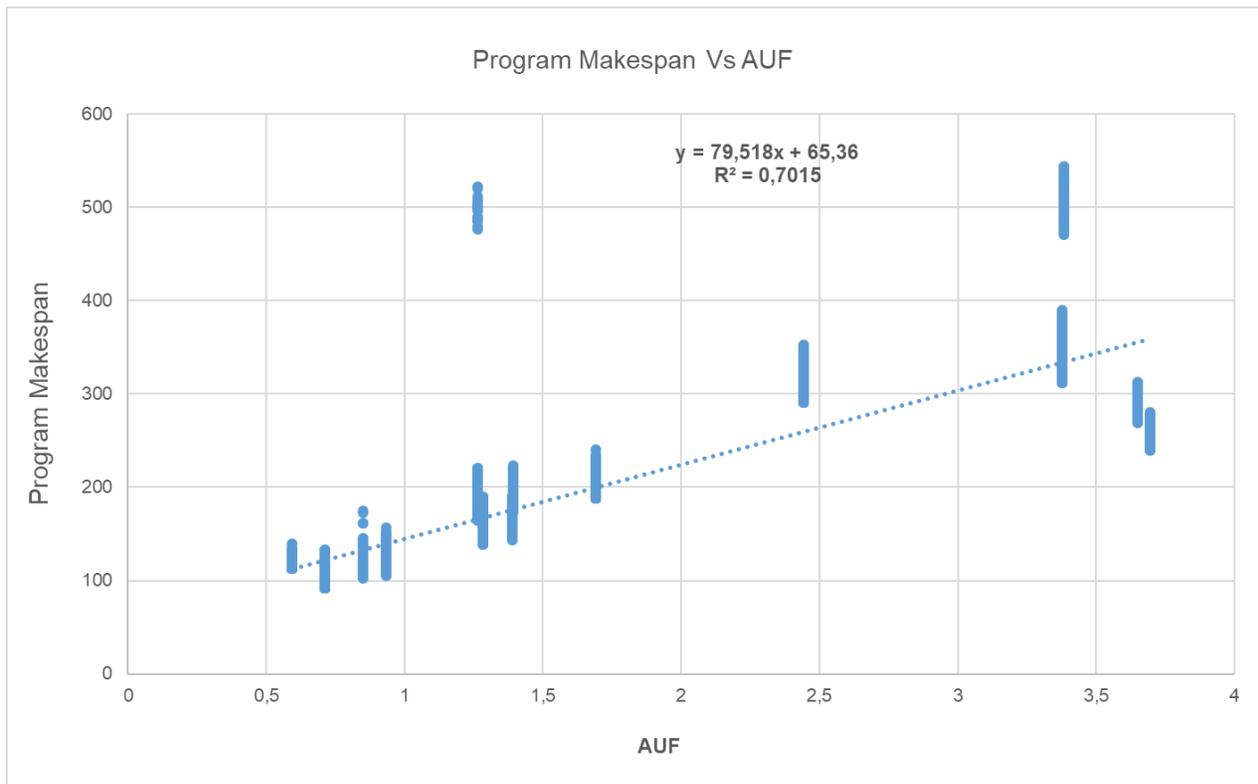
1. Verificar que el multi-proyecto cumpla los supuestos planteados en el modelo básico del RCMPSP tal como se define en la **sección 4.2**.
2. Adaptar el cronograma del multi-proyecto al formato de instancia definido en la **sección 6.9**:
 - 2.1. En Información general del proyecto se insertan: el número de proyectos, el número de actividades, el peso específico de cada proyecto con criterios del usuario, la fecha de entrada, la fecha de salida y el número de unidades de tiempo según la ruta crítica. De acuerdo con la **Tabla 42**.
 - 2.2. Según la **Tabla 43** la cual corresponde a la Descripción de los recursos, se introduce: el tipo de recurso, la cantidad total disponible de recursos por tipo y el costo asociado a cada uno.

- 2.3. Para las relaciones de precedencia (Ver **Tabla 44**): en la columna denominada *Project* se relaciona el número del proyecto, en la columna que describe las actividades *Jobnr* se presentan el número de cada actividad por proyecto y en las dos últimas columnas se presentan el número de sucesoras por actividad y el total.
 - 2.4. De acuerdo con la **Tabla 45** sobre la duración y recursos globales se asigna la duración y el número de recursos por tipo.
3. Haciendo uso del *software* desarrollado por Aristizábal et al., (2017) se carga el archivo de la instancia generado en el numeral anterior, y se comienza a ejecutar cada una de las combinaciones y reglas de prioridad presentadas como las mejores, en su orden:
 - ✓ MS MCS FCFS
 - ✓ MCS
 - ✓ EDD
 - ✓ MS
 - ✓ MINLFT
 - ✓ MINSLK-MINWCS WAP
 - ✓ MINSLK-MINWCS WPP
 4. Una vez obtenidos los resultados se elige como solución óptima la de menor valor de *Makespan*.

6.8. Regresión lineal

De acuerdo con lo propuesto en la metodología, se utilizó el método de regresión lineal para encontrar la relación entre las variables *Makespan*, AUF y Complejidad. Para la relación *Makespan* Vs AUF se observa una pendiente positiva con un coeficiente de determinación (R^2) igual 0.7015, como se observa en la **Gráfica 27**.

Gráfica 27. Relación entre *Program Makespan* y AUF



Fuente: Los autores

En la **Tabla 37** se presentan los coeficientes estadísticos de la regresión, tales como: Error típico, Estadístico t, Probabilidad, nivel de confianza y R^2 .

Tabla 37. Resultados Regresión Program Makespan Vs AUF

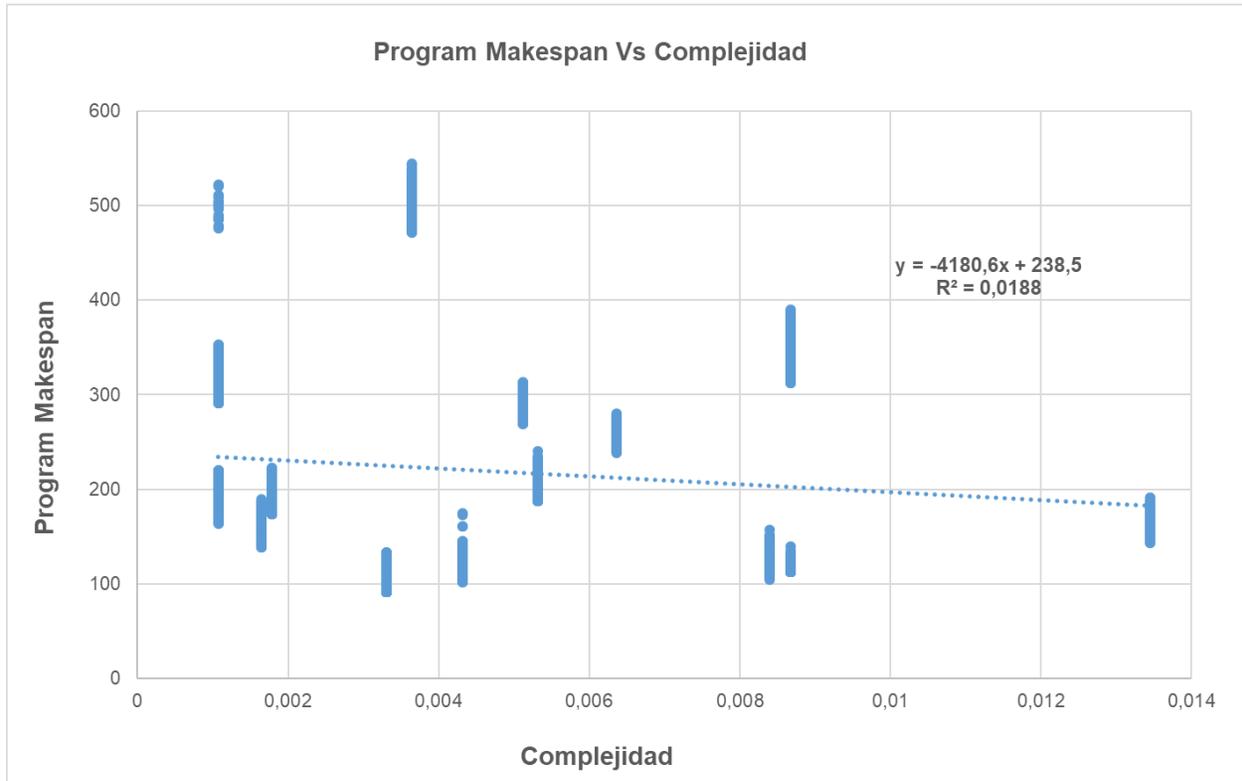
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	65,3598261	0,38997771	167,598875	0	64,5954731	66,1241791
AUF	79,5179169	0,1766981	450,021335	0	79,1715901	79,8642437

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,83752886
Coefficiente de determinación R^2	0,70145459
R^2 ajustado	0,70145113
Error típico	57,921423
Observaciones	86196

Fuente: Los autores

Para la relación *Makespan* Vs Complejidad se observa una pendiente negativa con un coeficiente de determinación (R^2) igual 0.0188, como se observa en la **Gráfica 28**.

Gráfica 28. Relación entre Program Makespan y Complejidad



Fuente: Los autores

En la **Tabla 38** se presentan los coeficientes estadísticos de la regresión, tales como: Error típico, Estadístico t, Probabilidad, nivel de confianza y R^2 .

Tabla 38. Resultados Regresión Program Makespan Vs Complejidad

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	60,22178614	0,27748247	217,029155	0	59,6779229	60,7656494
AUF	-1387,131655	44,3419837	-31,2825801	1,275E-213	-1474,04157	-1300,22174

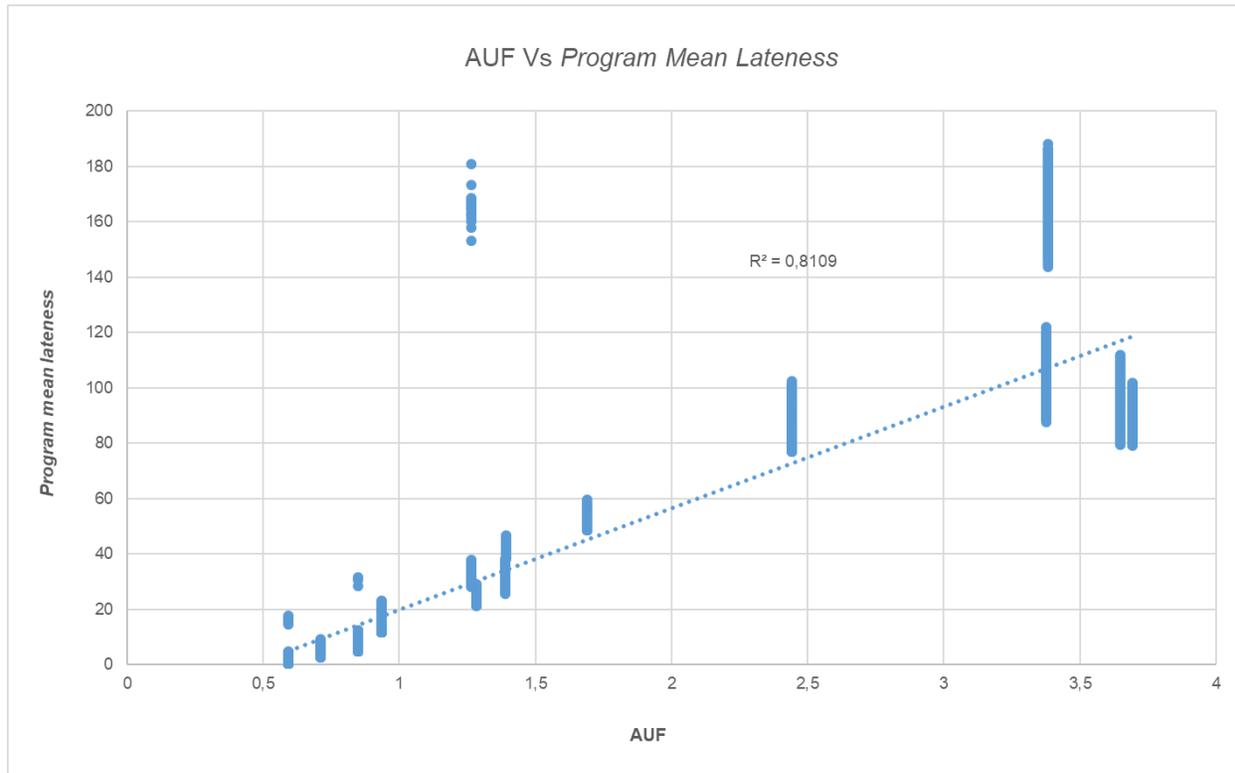
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,105952831
Coeficiente de determinación R ²	0,011226002
R ² ajustado	0,011214531
Error típico	45,24548925
Observaciones	86196

Fuente: Los autores

De acuerdo con los resultados se observa que existe una relación positiva entre *Makespan* y AUF y una ausencia de relación entre *Makespan* y Complejidad. Observando los resultados estadísticos de la regresión se puede concluir que los estimadores son significativos al 95% de confianza en ambas regresiones. Sin embargo, no ocurre lo mismo con los coeficientes de correlación (R^2) ya que para la relación entre *Makespan* y AUF es de 0.7014 y *Makespan* y Complejidad es de 0.0188, lo que quiere decir que en la primera si existe una correlación lineal de los datos, pero no se puede asegurar lo mismo en la segunda.

Se demuestra entonces que el AUF tiene un impacto positivo en el *Makespan* debido a que medida que aumenta el uso de recursos dentro del programa también aumenta el tiempo de completamiento del multi-proyectos, esto porque como el AUF representa la restricción de recursos, es lógico que si aumentan las restricciones de los mismos también aumenta la probabilidad que las actividades se retrasen. Esto se puede ver con mayor claridad en la **Gráfica 29** que muestra la relación *Program Mean Lateness* y AUF.

Gráfica 29. Relación entre AUF Vs Program Mean Latenes



Fuente: Los autores

6.9. Identificación y caracterización instancia de mayor complejidad

De acuerdo con lo descrito en la sección Identificación y caracterización de instancias de mayor complejidad del numeral 5.1.2.3 se seleccionó como instancia de mayor complejidad el problema 1 del Libro de trabajo en Excel # 1 (*Test Problem 1.xls.*) del primer archivo .ZIP (*Rep 1*). El cual se explica a continuación:

En la **Tabla 39** se observan los datos correspondientes a cantidad de actividades (size) 20 actividades por proyecto, complejidad de la red HHH (*High-High-High*), reproceso de las actividades (% *Feedback Deps*), NARLF, AUF, MAUF deseados, actuales y la diferencia entre estos dos últimos.

Tabla 39. Parámetros de la instancia

Size	20					
Desired Complexity	HHH	.14 = Low	Desired:	NARLF	AUF	MAUF
		.69 = High	Actual:	-3		0.6
% Feedback Deps.	20%	10% = Low	Diff.:	-3.01	0.337	0.599
		20% = High	Variance:	-0.014		-0.0008
			Desired Var.:	27.8	0.076	0.2492
				8	0	0.25

Fuente: Browning & Yassine (2016)

Donde:

- *Desired Complexity* es la complejidad del multi-proyectos clasificada como alta o baja para este caso de tres proyectos es “HHH”.
- *% Feedbacks Deps.*, es el porcentaje de probabilidad de cada uno de los arcos de reproceso, en donde un arco de reproceso se refiere al numero de veces que se debe repetir una actividad para corregir las posibles desviaciones que ocurran.
- Para AUF, NARLF y MAUF se encuentran los valores deseados, actuales y su diferencia.

En la **Tabla 40** se observa el tiempo total que es la suma del tiempo de generación (*Generation Time*) y el tiempo de visualización (*Display Time*), seguido a esto se observan los parámetros de costo de retraso, presupuesto, prioridad, factor de utilización de recursos actual y deseado de cada uno de los proyectos.

Tabla 40. Caracterización de los Proyectos

Generation Time:	15	Display Time:	2	Total Time:	17
Total Generations:	3	MAUF failures:	0		
Budget = E[cost] * 1.1					
	Project 1	Project 2	Project 3		
Cost of delay:	300 (k\$/day)	200 (k\$/day)	100 (k\$/day)		
Budget:	2062.5 (k\$)	2818.2 (k\$)	2163.7 (k\$)		
Priority:	1	2	3		
ARLF:	3.486	0.431	2.397		
Desired ARLF:					
Average Desired ARLF:	#DIV/0!	Variance in Desired ARLFs:	#DIV/0!	Actual ARLF:	2.10

Fuente: Browning & Yassine (2016)

Donde:

- *Generation Time*: Tiempo total de generación cada una como función de C, NARLF y MAUF.

- *Display time*: Tiempo de visualización.
- *Cost of delay*: Costo de demoras.

En la **Tabla 41** se registran los tipos de recursos, su disponibilidad y los respectivos costos diarios.

Tabla 41. Tipo de Recursos

Resource	Min. Rqd.	# Available	Cost/day (\$k)
A	9	140	\$1.00
B	9	834	\$1.00
C	9	938	\$1.00
D	9	854	\$1.00
E	0	0	\$1.00
F	0	0	\$1.00

Fuente: Browning & Yassine (2016)

Donde:

- *Resource*: Tipo de recursos
- *Min. Rqd.*: Mínimo de recursos requeridos
- *Available*: Número de recursos disponibles
- *Cost/day*: Costo por día

En la **Ilustración 15**, **Ilustración 16** e **Ilustración 17** se muestran el DSM, número de precedencias, complejidad, actos de inicio y fin de cada proyecto; a continuación se explica detalladamente el proyecto 1.

Ilustración 15. Caracterización DSMs Proyecto 1

Project 1
 # start acts: 10
 # finish acts: 10
 # deps.: 75
 Network Complex: .69

	Network Complex																				T	Resources						Duration			EF LF S			Succ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		A	B	C	D	E	F	O	ML	P	EF	LF	S	
1	1																				1	5	7	1	4				9	9	9	0	9	
2		1																			1	9	3	2	3				7	7	9	2	8	
3			1																		1	1	8	6	1				4	4	9	5	9	
4				1																	1	6	4	9	3				5	5	9	4	7	
5					1																1	6	4	7	1				2	2	9	7	8	
6						1															1	5	4	4	4				9	9	10	1	7	
7							1														1	6	2	1	3				3	3	10	7	6	
8								1													1	4	6	3	2				1	1	10	9	6	
9									1												1	5	4	4	1				8	8	9	1	8	
10										1											1	3	5	8	1				2	2	9	7	7	
11											1										2	4	4	1	2				1	9	18	9	0	
12												1									2	9	2	8	6				7	16	18	2	0	
13													1								2	3	8	4	3				6	15	18	3	0	
14														1							2	2	9	5	5				1	10	18	8	0	
15															1						2	5	7	8	9				1	10	18	8	0	
16																1					2	7	8	5	4				3	12	18	6	0	
17																	1				2	2	6	9	8				8	17	18	1	0	
18																		1			2	6	9	9	3				2	11	18	7	0	
19																			1		2	4	9	2	8				9	18	18	0	0	
20																					2	6	3	6	8				6	15	18	3	0	

Fuente: Browning & Yassine (2016)

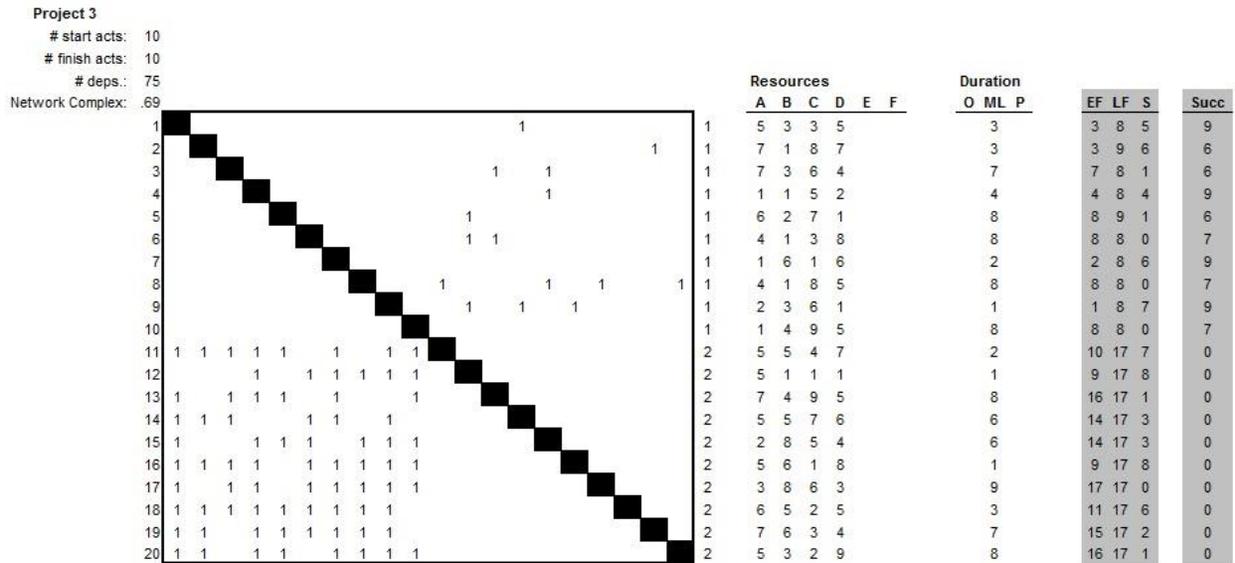
Ilustración 16. Caracterización Proyecto 2

Project 2
 # start acts: 10
 # finish acts: 10
 # deps.: 75
 Network Complex: .69

	Network Complex																				T	Resources						Duration			EF LF S			Succ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		A	B	C	D	E	F	O	ML	P	EF	LF	S	
1	1																				1	3	8	1	2				9	9	9	0	7	
2		1																			1	9	4	7	6				9	9	9	0	8	
3			1																		1	1	8	2	7				3	3	9	6	6	
4				1																	1	5	3	3	1				9	9	10	1	8	
5					1																1	8	1	4	7				6	6	9	3	7	
6						1															1	1	7	6	3				3	3	9	6	7	
7							1														1	8	5	5	5				9	9	9	0	9	
8								1													1	1	3	8	2				8	8	10	2	7	
9									1												1	1	7	7	7				6	6	10	4	7	
10										1											1	3	8	6	1				9	9	9	0	9	
11											1										2	2	2	2	6				1	10	18	8	0	
12												1									2	7	4	7	8				5	14	18	4	0	
13													1								2	3	4	5	4				5	14	18	4	0	
14														1							2	9	4	8	3				4	13	18	5	0	
15															1						2	6	4	9	9				8	17	18	1	0	
16																1					2	2	7	9	9				9	18	18	0	0	
17																	1				2	3	4	8	9				1	10	18	8	0	
18																		1			2	8	7	4	8				2	11	18	7	0	
19																			1		2	6	6	2	9				6	15	18	3	0	
20																					2	6	4	7	8				6	15	18	3	0	

Fuente: Browning & Yassine (2016)

Ilustración 17 Caracterización del Proyecto 3



Fuente: Browning & Yassine (2016)

Los tres proyectos tienen:

- Complejidad 0.69 es decir “HHH”,
- Número total de precedencias es 75,
- Número total de actividades es el total de recuadros negros de la diagonal para este caso 20 actividades; y una precedencia de la actividad i a j se anota mediante una entrada en la celda (j, i) (fila j , columna i) para estos proyectos; de la diagonal hacia arriba se muestran los posibles reprocesos con una probabilidad de ocurrencia del 10%. Sin embargo, este parámetro no consideró en este trabajo de grado.

A la derecha se encuentran cuatro tablas en donde se muestran:

- *Resources*: Numero total de cada tipo de recursos por actividad.
- *Duration*: Tiempo requerido por actividad
- *EF- Early Finish*, (Final temprano)
- *LF- Late Finish*, (Final tardío)
- *S - Slack*, (Holgura)
- *Successor*: Número de sucesoras por actividad.

Al introducir los datos en el formato definido para el *software* desarrollado en la investigación de Aristizábal et al., (2017), se obtuvo como resultado lo que se muestra en la **Tabla 42** y **Tabla 43**.

Tabla 42. Información general del proyecto

PROJECTS		3				
Project No.	Jobs No.	Weight	Start Date	Due Date		CPD
1	20	1	-1	-1		18
2	20	1	-1	-1		18
3	20	1	-1	-1		17

En la información general del proyecto la instancia se compone de 3 proyectos con las siguientes propiedades: 20 actividades por proyecto, se establece el peso específico (*Weight*) de cada proyecto con criterios del usuario (para este caso es 1) y fechas de entrada (*Start date*) y fecha de entrega (*Due date*) con su correspondiente ruta crítica (CPD).

Tabla 43. Descripción de los recursos cantidad disponible

RESOURCES		
Global renewable	4	
RESOURCE AVAILABILITIES		COST
R1	140	1
R2	834	1
R3	938	1
R4	854	1

Se expresan los recursos globales de la instancia y cada recurso contiene la capacidad total disponible con el costo por uso de cada recurso.

En la **Tabla 44** se describen las relaciones de precedencia y se asumen como tipo Fin Comienzo.

Tabla 44. Relaciones de precedencia

PRECEDENCE RELATIONS		Successors	
Project	Jobnr.	#Relations	Successors
1	1	10	2;3;4;5;6;7;8;9;10;11
1	2	9	13;14;15;16;17;18;19;20;21
1	3	7	12;15;16;13;18;19;20
1	4	9	12;13;15;16;18;19;20;17;21
1	5	7	12;15;17;18;19;20;21
1	6	8	12;13;15;16;17;19;20;21
1	7	7	13;14;15;16;18;19;21
1	8	6	12;15;17;18;19;21
1	9	6	12;14;15;16;17;18
1	10	8	12;13;14;15;17;19;20;21
1	11	7	13;15;16;17;18;20;21
1	12	0	
1	13	0	
1	14	0	
1	15	0	
1	16	0	
1	17	0	
1	18	0	
1	19	0	
1	20	1	22
1	21	0	
1	22	0	

Continuación Tabla 44

PRECEDENCE RELATIONS		Successors	
Project	Jobnr.	#Relations	Successors
2	1	10	2;3;4;5;6;7;8;9;10;11
2	2	7	12;14;15;16;17;18;20
2	3	8	12;14;16;17;18;19;20;21
2	4	6	12;14;15;16;17;18
2	5	8	12;13;14;15;16;18;20;21
2	6	7	13;15;16;17;19;20;21
2	7	7	12;13;14;15;16;17;19
2	8	9	12;13;14;16;17;18;19;20;21
2	9	7	12;14;16;18;19;20;21
2	10	7	12;13;15;16;18;19;20
2	11	9	12;13;14;15;16;17;18;20;21
2	12	0	
2	13	0	
2	14	0	
2	15	0	
2	16	0	
2	17	1	22
2	18	0	
2	19	0	
2	20	0	
2	21	0	
2	22	0	

Continuación Tabla 44

PRECEDENCE RELATIONS		Successors	
Project	Jobnr.	#Relations	Successors
3	1	10	3;4;5;6;7;8;9;10;11;12
3	2	9	13;15;16;17;18;19;20;21;22
3	3	6	13;16;18;20;21;22
3	4	6	13;15;16;18;19;20
3	5	9	13;14;15;17;18;19;20;21;22
3	6	6	13;15;17;20;21;22
3	7	7	14;16;17;18;19;20;21
3	8	9	13;14;15;16;18;19;20;21;22
3	9	7	14;17;18;19;20;21;22
3	10	9	13;14;16;17;18;19;20;21;22
3	11	7	13;14;15;17;18;19;22
3	12	0	
3	13	0	
3	14	0	
3	15	0	
3	16	0	
3	17	0	
3	18	1	23
3	19	0	
3	20	0	
3	21	0	
3	22	0	

En la **Tabla 45** se establece la duración y el requerimiento de recursos globles de cada una de las actividades de cada proyecto

Tabla 45. Duración y recursos globales

REQUESTS/DURATIONS							
Project	Jobnr.	Weight	Duration	R 1	R 2	R 3	R 4
1	1	1	0	0	0	0	0
1	2	1	9	5	7	1	4
1	3	1	7	9	3	2	3
1	4	1	4	1	8	6	1
1	5	1	5	6	4	9	3
1	6	1	2	6	4	7	1
1	7	1	9	5	4	4	4
1	8	1	3	6	2	1	3
1	9	1	1	4	6	3	2
1	10	1	8	5	4	4	1
1	11	1	2	3	5	8	1
1	12	1	1	4	4	1	2
1	13	1	7	9	2	8	6
1	14	1	6	3	8	4	3
1	15	1	1	2	9	5	5
1	16	1	1	5	7	8	9
1	17	1	3	7	8	5	4
1	18	1	8	2	6	9	8
1	19	1	2	6	9	9	3
1	20	1	9	4	9	2	8
1	21	1	6	6	3	6	8
1	22	1	0	0	0	0	0

Continuación Tabla 45

REQUESTS/DURATIONS							
Project	Jobnr.	Weight	Duration	R 1	R 2	R 3	R 4
2	1	1	0	0	0	0	0
2	2	1	9	3	8	1	2
2	3	1	9	9	4	7	6
2	4	1	3	1	8	2	7
2	5	1	9	5	3	3	1
2	6	1	6	8	1	4	7
2	7	1	3	1	7	6	3
2	8	1	9	8	5	5	5
2	9	1	8	1	3	8	2
2	10	1	6	1	7	7	7
2	11	1	9	3	8	6	1
2	12	1	1	2	2	2	6
2	13	1	5	7	4	7	8
2	14	1	5	3	4	5	4
2	15	1	4	9	4	8	3
2	16	1	8	6	4	9	9
2	17	1	9	2	7	9	9
2	18	1	1	3	4	8	9
2	19	1	2	8	7	4	8
2	20	1	6	6	6	2	9
2	21	1	6	6	4	7	8
2	22	1	0	0	0	0	0

Continuación Tabla 45

REQUESTS/DURATIONS							
Project	Jobnr.	Weight	Duration	R 1	R 2	R 3	R 4
3	1	1	0	0	0	0	0
3	2	1	3	5	3	3	5
3	3	1	3	7	1	8	7
3	4	1	7	7	3	6	4
3	5	1	4	1	1	5	2
3	6	1	8	6	2	7	1
3	7	1	8	4	1	3	8
3	8	1	2	1	6	1	6
3	9	1	8	4	1	8	5
3	10	1	1	2	3	6	1
3	11	1	8	1	4	9	5
3	12	1	2	5	5	4	7
3	13	1	1	5	1	1	1
3	14	1	8	7	4	9	5
3	15	1	6	5	5	7	6
3	16	1	6	2	8	5	4
3	17	1	1	5	6	1	8
3	18	1	9	3	8	6	3
3	19	1	3	6	5	2	5
3	20	1	7	7	6	3	4
3	21	1	8	5	3	2	9
3	22	1	0	0	0	0	0

Con el fin de comprobar la complejidad de cada una de las redes de programación de los proyectos definido en el generador de instancias de (Browning & Yasine, 2016) cuyo valor es: $C = 0,691358029842376$; se despejó el número de relaciones por precedencia a partir de la siguiente fórmula:

$$C = \frac{4A' - 4N - 4}{(N - 2)^2}$$

$$A' = \frac{C * (N - 2)^2 + 4 * N + 4}{4}$$

$$A' = 75$$

Teniendo en cuenta el anterior resultado se comprueba que la instancia es de alta complejidad. En el (Anexo F) se adjunta el archivo excel con la instancia descrita.

6.7 Caracterización de un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia

1. Características Generales del Proyecto

- **Nombre del Proyecto:** PORTAL DEL PARQUE
- **Características del Proyecto**
 - Área: Apartamentos de 50,25 m²
 - Tipo de Vivienda: Vivienda de Interés Social (VIS).
 - Conjunto Cerrado. 100 apartamentos distribuidos en 2 etapas.
 - 5 Torres de 5 Pisos
 - Parqueaderos comunes (1 Parqueaderos por cada 2 Aptos.)
 - En zonas Comunes: Piscina para adultos y niños, amplias zonas verdes tipo campestre, juegos infantiles, juegos de mesa, ruta de vida con gimnasio al aire libre, zona social para eventos y portería.
 - 20 parqueaderos para visitantes.
- **Localización:** Distrito de Aguablanca - Valle del Cauca.
- **Constructor:** CONSTRUCCIONES CIVILES S.A. (CONCIVILES S.A.)

2. Características Planeación del Proyecto

2.1. Plan de Gestión del Cronograma

Para el multi-proyecto, el método utilizado por la firma CONCIVILES S.A, es diagramación por precedencia (PDM), el cual es una técnica utilizada para construir un modelo de programación en el cual las actividades se representan mediante nodos y se vinculan gráficamente mediante una o más relaciones lógicas para indicar la secuencia en que deben ser ejecutadas. El *software* utilizado fue *Microsoft Project*.

2.2. Dependencias

El PDM incluye cuatro tipos de dependencias o relaciones lógicas y los tipos de Relaciones del Método de Diagramación por Precedencia (PDM) se definen: 1) Final a Inicio (FS), 2) Final a Final (FF), 3) Inicio a Inicio (SS) y 4) Inicio a Final (SF). Para el caso de estudio la mayoría de las actividades son Final a Inicio (FS), Final a Final (FF) e Inicio a Inicio (SS).

2.3. Proyectos

Consta de 5 proyectos. El proyecto No. 1 contempla la construcción de una torre residencial y las áreas comunes: piscina y salón social. Además de las obras de urbanismo.

Los 4 proyectos restantes involucran la construcción de cada una de las torres residenciales faltantes con sus respectivos entornos urbanísticos.

2.4. Actividades

Para cada proyecto se identificó el número de actividades con su respectiva ruta crítica. Para el proyecto No. 1 se identificaron 185 actividades y una ruta crítica de 245 unidades de tiempo. Para los demás proyectos se identificaron 154 actividades y una ruta crítica de 245 unidades de tiempo.

2.5. Estimación de recursos

Se identificaron 174 tipos de recursos locales, independientes, limitados y renovables con sus respectivos costos. Para cada actividad de cada proyecto se identificó el número de relaciones y sus respectivas sucesoras.

- **Proyecto No. 1.** 311 relaciones para las 185 actividades.
- **Proyectos No. 2 a No. 5.** 256 relaciones para las 154 actividades.

2.6. Estimación de la duración de las actividades

Se identificó por actividad la duración y el tipo de recurso asociado, la duración por tratarse de un único valor es determinística.

En la **Tabla 46** se muestra la caracterización para el proyecto No. 1, para el cual se asumen los siguientes supuestos:

- **Enfoque de Single Model Project Schedule:** el caso de estudio tiene un enfoque multi-proyectos, ya que cada proyecto posee rutas críticas de manera independiente. Razón por la cual la fecha de terminación teórica de los mismos fue calculada teniendo en cuenta cada ruta crítica, para el caso de estudio todas las duraciones son iguales a pesar que el proyecto No. 1 cuenta con dos actividades adicionales (piscina y el salón comunal) que no tienen incidencia en la ruta crítica.
- **Ambiente estático con un conjunto de proyectos predefinido sin permitir la llegada de nuevos proyectos:** la ejecución del proyecto se realizó en un ambiente estático, puesto que no se permitió la construcción de más torres de las que se planearon desde el inicio
- **Todos los proyectos inician en tiempo cero:** Producto de la investigación realizada se caracterizó el caso con este supuesto, sin embargo, para el caso real los proyectos no inician de manera simultánea ya que existe un factor económico que lo impide.
- **Los proyectos son independientes y se unen mediante una actividad ficticia (dummy) al principio y al final:** para la identificación y caracterización del caso se organizó la información en el formato excel definido por el *software*, en donde se incluyó para cada proyecto el dummy de inicio y de fin, no obstante al revisar las

programaciones utilizadas en MS project estas no son tenidas en cuenta por la constructora.

- **Transfer times son considerados iguales a cero:** No se consideran tiempos de transferencia según la planeación de la empresa.
- **Demanda de recursos por actividad:** cada actividad tiene una demanda predefinida de recursos.
- **No se permite *preemption* para las actividades (una vez la actividad inicia, su progreso no es interrumpido):** para la caracterización del caso según las suposiciones del *software* se asume que las actividades no son interrumpidas.

Al introducir los datos en el formato definido para el software desarrollado en la investigación de Aristizábal et al., (2017) se obtuvo como resultado lo que se muestra en la **Tabla 46**.

Tabla 46. Caracterización del proyecto No. 1 del multi-proyecto “Portal del Parque”

PROJECTS		5				
Project No.	Jobs No.	Weight	Start Date	Due Date	CPD	
1	185	1	-1	-1	245	

RESOURCES			
Global renewable		174	
RESOURCE AVAILABILITIES		COST	
R1	1	\$10.000.000	
R2	1	\$25.000.000	
R3	1	\$6.500	
R4	1	\$80.000	
PRECEDENCE RELATIONS		Successors	
Project	Jobnr.	#Relations	Successors
1	185	0	0

Continuación Tabla 46.

REQUESTS/DURATIONS			
Project	Jobnr.	Weight	Duration
1	1	1	22
1	2	1	3
1	3	1	3
1	4	1	3
1	5	1	6
1	6	1	15
1	7	1	15
1	8	1	14
1	9	1	28
1	10	1	1
1	11	1	3
1	12	1	11
1	13	1	11
1	14	1	45
1	15	1	45
1	16	1	3
1	17	1	45
1	18	1	10
1	19	1	45
1	20	1	45
1	21	1	45
1	22	1	32
1	23	1	10
1	24	1	8
1	25	1	5
1	26	1	20
1	27	1	10
1	28	1	10
1	29	1	10
1	30	1	10
1	31	1	10
1	32	1	40
1	33	1	20

Continuación Tabla 46.

REQUESTS/DURATIONS			
Project	Jobnr.	Weight	Duration
1	34	1	30
1	35	1	35
1	36	1	40
1	37	1	20
1	38	1	40
1	39	1	30
1	40	1	20
1	41	1	35
1	42	1	35
1	43	1	35
1	44	1	35
1	45	1	20
1	46	1	35
1	47	1	20
1	48	1	20
1	49	1	20
1	50	1	15
1	51	1	15
1	52	1	15
1	53	1	15
1	54	1	7
1	55	1	15
1	56	1	25
1	57	1	20
1	58	1	20
1	59	1	10
1	60	1	15
1	61	1	10
1	62	1	2
1	63	1	15
1	64	1	8
1	65	1	10
1	66	1	15
1	67	1	20
1	68	1	10
1	69	1	15
1	70	1	120

Continuación Tabla 46.

REQUESTS/DURATIONS			
Project	Jobnr.	Weight	Duration
1	71	1	130
1	72	1	8
1	73	1	130
1	74	1	0
1	75	1	50
1	76	1	20
1	77	1	1
1	78	1	1
1	79	1	96
1	80	1	30
1	81	1	5
1	82	1	120
1	83	1	130
1	84	1	120
1	85	1	0
1	86	1	8
1	87	1	69
1	88	1	39
1	89	1	4
1	90	1	5
1	91	1	2
1	92	1	5
1	93	1	1
1	94	1	1
1	95	1	1
1	96	1	1
1	97	1	4
1	98	1	2
1	99	1	3
1	100	1	1
1	101	1	1
1	102	1	1
1	103	1	2
1	104	1	1
1	105	1	1
1	106	1	1
1	107	1	1

Continuación Tabla 46.

REQUESTS/DURATIONS			
Project	Jobnr.	Weight	Duration
1	108	1	1
1	109	1	1
1	110	1	1
1	111	1	1
1	112	1	2
1	113	1	5
1	114	1	8
1	115	1	15
1	116	1	10
1	117	1	4
1	118	1	3
1	119	1	3
1	120	1	5
1	121	1	4
1	122	1	3
1	123	1	2
1	124	1	4
1	125	1	2
1	126	1	3
1	127	1	2
1	128	1	2
1	129	1	3
1	130	1	2
1	131	1	2
1	132	1	2
1	133	1	3
1	134	1	15
1	135	1	8
1	136	1	20
1	137	1	5
1	138	1	8
1	139	1	8
1	140	1	10
1	141	1	4
1	142	1	10
1	143	1	5
1	144	1	4

Continuación Tabla 46.

REQUESTS/DURATIONS			
Project	Jobnr.	Weight	Duration
1	145	1	1
1	146	1	2
1	147	1	2
1	148	1	5
1	149	1	4
1	150	1	5
1	151	1	4
1	152	1	1
1	153	1	1
1	154	1	5
1	155	1	1
1	156	1	1
1	157	1	1
1	158	1	1
1	159	1	1
1	160	1	1
1	161	1	1
1	162	1	1
1	163	1	1
1	164	1	1
1	165	1	5
1	166	1	25
1	167	1	110
1	168	1	0
1	169	1	20
1	170	1	20
1	171	1	110
1	172	1	20
1	173	1	5
1	174	1	10
1	175	1	20
1	176	1	5
1	177	1	5
1	178	1	3
1	179	1	5
1	180	1	8
1	181	1	4

Continuación Tabla 46.

REQUESTS/DURATIONS			
Project	Jobnr.	Weight	Duration
1	182	1	60
1	183	1	5
1	184	1	0
1	185	1	32

Fuente: Los autores

El archivo tipo excel con la caracterización total de la instancia del multi-proyecto del sector de la construcción se presenta en el (Anexo G).

Con el fin de calcular la complejidad de cada una de las redes de programación de los proyectos, se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = \frac{4A' - 4N - 4}{(N - 2)^2}$$

Para el proyecto No. 1 $C = 0.015$, proyecto No. 2 $C = 0.017$, proyecto No. 3 $C = 0.017$, proyecto No. 4 $C = 0.017$ y para el proyecto No. 5 $C = 0.017$. Lo que indica que la complejidad de las redes de programación de este multi-proyecto es baja.

7. CONCLUSIONES

Al realizar el análisis del comportamiento de las medidas de desempeño de las 19 reglas de prioridad, las 4.788 combinaciones dobles y las 81.396 combinaciones triples, en las 14 instancias de complejidad baja seleccionadas, se concluye:

Una vez realizada la comparación de las 5 primeras reglas o combinaciones por cada medida de desempeño, se observó que las que presentaron mejor desempeño en la mayoría de las medidas evaluadas fueron: MS, MCS y EDD.

Se confirmó la superioridad de la regla de prioridad MS (*Maximum Successors*) descrita en la investigación adelantada por Aristizábal et al., (2017), siendo individualmente la mejor y haciendo parte de la combinación triple que mejor desempeño presentó en este análisis: MS MCS FCFS.

Al realizar el análisis considerando el comportamiento en todas las medidas de desempeño, se identificaron como las mejores reglas las siguientes: MINSLK-MINWCS WPP, MINSLK-MINWCS WAP, MS, MINLFT, EDD, MCS y MS MCS FCFS.

Dado que los anteriores resultados se obtuvieron asumiendo que las variables eran deterministas, fue necesario realizar un análisis de aleatoriedad para confirmar el desempeño de las mejores reglas obtenidas. El método utilizado fue ANOVA para datos no paramétricos Kruskal-Wallis, en el cual la variable de salida principal analizada fue *Makespan*.

De este análisis se concluye que las mejores PRs en desempeño en *Makespan* son: MS MCS FCFS, MCS, EDD, MS, MINLFT, MINSLK-MINWCS WAP, MINSLK-MINWCS WPP.

De lo anterior se puede observar que MINSLK-MINWCS WAP, MINSLK-MINWCS WPP como combinaciones dobles y MS MCS FCFS como combinación triple superan en desempeño a las reglas individuales MCS, EDD, MS y MINLFT. Por lo tanto, se concluye que las combinaciones dobles y triples de las reglas de prioridad si mejoran el desempeño de las medidas en tiempo de los multi-proyectos respecto a las reglas individuales.

Se concluye para este estudio que las reglas de prioridad basadas en actividad son las de mejor desempeño para reducir el tiempo de completamiento de los multi-proyectos (*Makespan*), teniendo en cuenta que las que se acaban de presentar como las mejores pertenecen a esta categoría.

De acuerdo con los resultados se observó que existe una relación positiva entre el tiempo de completamiento de un multi-proyecto (*Makespan*) y el uso de los recursos (AUF), así como una ausencia de relación con la Complejidad.

Se demuestra entonces que el AUF tiene un impacto positivo en el *Makespan* debido a que a medida que aumenta el uso de recursos dentro del programa también aumenta el tiempo de completamiento del multi-proyectos, esto porque como el AUF representa la restricción de recursos, es lógico que si aumentan las restricciones de los mismos también aumenta la probabilidad que las actividades se retrasen.

Producto del contacto realizado con uno de los autores representativos en este tema de investigación, Tyson R. Browning, se tuvo acceso a un generador de instancias a través del cual se identificó y caracterizó una instancia de complejidad alta, que como se mencionará en el trabajo futuro puede ser utilizada para evaluar métodos de solución al problema RCMPSP en redes de mayor complejidad a las que se pobaron en este estudio.

Se concluye respecto a la caracterización como instancia del multi-proyecto del sector de la construcción, que la empresa de la cual se tomó tiene oportunidad de mejora en cuanto a la cultura de gerencia de proyectos ya que no se observó una clara asignación de los recursos en la red de programación.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Teniendo en cuenta que el ranking global se realizó asumiendo datos deterministas, se recomienda que en posteriores investigaciones se lleven a cabo todas las réplicas o repeticiones de las combinaciones resultantes en esta investigación, para instancias que contenga igual número de proyectos y de actividades.

Dado que en el presente estudio las instancias probadas fueron de complejidad baja y aprovechando el acceso al generador desarrollado por (Browning & Yassine, 2010), <http://sbuweb.tcu.edu/tbrowning/RCMPSPinstances.htm>, se recomienda para investigaciones posteriores utilizar instancias de complejidad alta.

Teniendo en cuenta que los proyectos del sector de la construcción tienen una gran cantidad de variables externas, se propone que el *software* desarrollado por Aristizábal et al., (2017) considere parámetros que faciliten la obtención de datos, y así los resultados puedan ser más acordes a la realidad.

Para mejorar el diseño experimental en futuras investigaciones, se recomienda seleccionar instancias que contengan el mismo número de proyectos y el mismo número de actividades con variación en sus complejidades.

De acuerdo con los resultados obtenidos con la regresión lineal y la relación encontrada entre el tiempo de terminación del proyecto (*Makespan*) y la asignación de recursos (AUF), sería interesante para futuras investigaciones realizar un modelo de predicción para estas variables.

Se recomienda en la utilización de las reglas de *prioridad WAP (Weight Activity Priority)* y *WPP (Weight Project Priority)* definir prioridad a las actividades y proyectos respectivamente con el fin de verificar el comportamiento de las medidas de desempeño.

Dar continuidad a esta investigación mediante una siguiente fase que permita aplicar el método heurístico propuesto en portafolios reales en diferentes sectores.

Comparar los resultados obtenidos en esta investigación con otras técnicas modernas de optimización, como algoritmos genéticos, otras heurísticas y metaheurísticas.

Se recomienda el desarrollo de un *software* que pueda complementarse con MS Project y otro de Gerencia de Proyectos como interfaz para la optimización de cronogramas reales.

9. PLAN DE GERENCIA

9.1. INTRODUCCIÓN

El presente documento describe el plan de gerencia que se utilizó para realizar las actividades del Trabajo de Grado, el cual se ha realizado bajo los lineamientos del PMBOK®, quinta edición y el modelo propuesto por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para el Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos.

El plan de gerencia contiene los resultados del desarrollo de los procesos de iniciación y planeación, así como los respectivos formatos y procesos para realizar el seguimiento, control y cierre del Trabajo de Grado.

9.2. INICIACIÓN

Los dos componentes del proceso de iniciación son el acta de constitución (*Project Charter*), en la cual se hace oficial el gerente del proyecto, se describe el propósito, los criterios de éxito, y se da inicio formal al Trabajo de Grado; y el registro de *Stakeholders*.

9.2.1. PROJECT CHARTER.

Fecha de emisión: 10 de noviembre de 2017

Se autoriza formalmente el Trabajo de Grado, el cual contó con el apoyo del Director de Proyecto, el equipo de trabajo y la Unidad de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito:

Nombre del Proyecto: Análisis de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP).

Sponsor: Ing. Germán Eduardo Giraldo González

Gerente de Proyecto asignado: Ing. María Angélica Ayala Betancourt

Descripción del Proyecto: El trabajo de grado consistió en el análisis de metodologías de reglas de prioridad que permiten dar solución al problema de programación de múltiples Proyectos con recursos restringidos (RCMPSP), con el fin de aportar al desarrollo de la gerencia de proyectos en el área de conocimiento de gestión de tiempo y a la línea de investigación secuenciación de proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Propósito: Contribuir al aumento de la probabilidad de éxito de la gerencia de proyectos, mediante la mejora de las medidas de desempeño en cuanto a tiempo y costo, a través del de la identificación y análisis de metodologías para la programación de múltiples proyectos con recursos restringidos, que sean aplicables a situaciones reales del entorno productivo colombiano.

Justificación: El cronograma es probablemente el documento de mayor importancia y con mayor influencia en el éxito de los proyectos (Lipke, 2008), y teniendo en cuenta que mediante este se hace comprensible el proyecto a todo el equipo de trabajo y se ajusta con exactitud a la realidad de la ejecución del mismo, es pertinente minimizar los riesgos de desviaciones en tiempo, buscando una asignación y gestión de recursos apropiada.

De esta manera, la parte más importante de una programación es la asignación de recursos y la armonización de su trabajo para reducir al mínimo la duración. No obstante, a la hora de planear el cronograma se suelen desconocer algunos factores ambientales en los cuales se desarrollan los proyectos, uno de ellos es el caso de los ambientes multi-proyectos en donde estos se desarrollan simultáneamente y deben compartir algunos recursos.

Estos problemas han sido definidos en el campo de la investigación de operaciones como Problemas de Programación de Múltiples Proyectos con Recursos Restringidos (*Resource Constrained Multi-project Scheduling Problem* RCMPSP). Debido a que la esencia de RCMPSP se basa en la mejora de los métodos heurísticos a través de las reglas de prioridad existentes, este trabajo busca aportar modelos de análisis y solución a dicho problema a través de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR).

Nivel de autoridad del Gerente del Proyecto: El Gerente de Proyecto tendrá la autoridad de designar al *staff* del proyecto para organizar el trabajo del mismo.

Gestión de Presupuesto: El Gerente de Proyecto deberá tener autorización por parte de los miembros del equipo de trabajo y del *sponsor* para asignar recursos de presupuesto a cualquier nivel del proyecto.

Decisiones Técnicas: El Gerente del Proyecto tendrá la autoridad de tomar decisiones en aspectos técnicos del proyecto siempre y cuando estos no cambien el alcance del mismo.

Criterios de éxito:

Se aceptará el trabajo de grado como exitoso siempre y cuando:

- Sea aprobado por el director y el comité de trabajos de grado.
- El documento definitivo se entregue el 03 de agosto de 2018.
- El costo del trabajo de grado no supere los COP \$ 68.344.540.

Como constancia de aprobación, se firma este documento el 10 de noviembre de 2017.

Ing. German Eduardo Giraldo González
Sponsor

Ing. María Angélica Ayala B
Gerente del Proyecto

9.2.2. Registro de *Stakeholders*

El registro de *Stakeholders* documenta la información relevante y el resultado del análisis de los individuos, grupos u organizaciones que pueden afectar o verse afectados positiva o negativamente por el desarrollo del trabajo de grado.

9.2.3. Identificación de *Stakeholders*

Para el proyecto “Análisis de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP)”, se han identificado once interesados, como lo describe la tabla 1.

La identificación y análisis de *Stakeholders* se realiza con el fin de documentar cuales son las partes interesadas en el proyecto con mayor influencia en este y que deben ser manejadas cuidadosamente para gestionar sus necesidades, expectativas y deseos con el fin de aumentar la probabilidad de éxito del proyecto.

El análisis de *Stakeholders* se realizó siguiendo la siguiente estructura:

- Identificación de los principales *Stakeholders* que pueden tener influencia en el desarrollo del trabajo de grado.
- Evaluar las partes interesadas identificadas según el poder e interés que pueden tener en desarrollo del proyecto. El poder se definió como la influencia y el control que pueden tener los interesados en el proyecto dando un peso de 60% y 40% respectivamente a cada variable. El interés se definió como el interés técnico, económico y social que puede tener cada interesado en el desarrollo del proyecto dando un peso de 40%, 40% y 20% respectivamente a cada tipo de interés. Al finalizar el análisis de poder-interés, se obtiene el índice P+I con el cual se pueden priorizar la importancia de los *Stakeholders* para el proyecto.
- Con la clasificación P+I del análisis de *Stakeholders*, se hace una lista priorizada de *Stakeholders* dando una puntuación que va de 1 a 8 siendo 1 el *Stakeholders* de mayor importancia y 8 el de menor importancia. Con la priorización se establecen estrategias genéricas de manejo de los *Stakeholders* del proyecto.

Tabla 47. Descripción de Stakeholders identificados

Identificación de Stakeholders		
ID	Stakeholders	Descripción
S-01	Director del Trabajo de Grado: Ing. Germán Eduardo Giraldo González	Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería, nombrado como director por el comité de trabajos de grado, quien realizará el acompañamiento y apoyará al equipo de trabajo en el desarrollo del trabajo de grado y es el Sponsor del proyecto.
S-02	Gerente del Trabajo de Grado: Ing. María Angélica Ayala Betancourt	Persona que liderará el equipo de trabajo, realizará el seguimiento y control, garantizando el cumplimiento de los entregables y satisfaciendo los requerimientos de los <i>Stakeholders</i> .
S-03	Equipo de Trabajo de Grado: Ing. María Ayala, Ing. Nancy Amaya, Ing. Rafael A. Doncel V, Ing. Oscar Sarmiento.	Recurso humano calificado que desarrollará las actividades necesarias para la realización y presentación de los entregables del Trabajo de Grado.
S-04	Miembros del Comité Trabajo de Grado - Unidad de Proyectos Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	Conjunto de profesionales que desde la Unidad de Proyectos de la Escuela definen dar o no viabilidad a la propuesta de trabajo de grado adelantada por los estudiantes de la maestría en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos.
S-05	Jurados	Profesionales asignados por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para la evaluación final del proyecto.
S-06	Asesor del Trabajo de Grado: Ing. Angélica Sarmiento.	Profesional que brindará asesoría técnica, resolverá inquietudes y orientará al equipo en temas específicos necesarios para el desarrollo del Trabajo de Grado.
S-07	Asesor Estadístico: Ing. Iván Mendivelso.	Profesional encargado de asesorar en temas avanzados de estadística y análisis de datos.
S-08	Aristizábal et al., (2017).	Estudiantes que desarrollaron la fase anterior y cuyos resultados son base para el desarrollo del presente trabajo de grado. Son <i>Stakeholders</i> interesados en que su trabajo de investigación tenga un mayor

Identificación de Stakeholders		
ID	Stakeholders	Descripción
		alcance a través de los resultados del presente proyecto.
S-09	Revistas Especializadas	Revistas especializadas interesadas en la publicación de avances en la investigación del problema RCMPSP.
S-10	Empresa del sector de la construcción.	Empresa que suministrará la información requerida para la identificación y caracterización como instancia de un multi-proyecto real
S-11	Familias de los integrantes del equipo de Trabajo de Grado.	Familias de los integrantes del equipo de Trabajo de Grado que se verán afectados por la baja disponibilidad de tiempo de los estudiantes que se encuentran en proceso de elaboración del Trabajo de Grado.

Fuente: Los autores

9.2.4. Clasificación y evaluación de los Stakeholders

Con base en la **Tabla 47**, en dónde se describieron cada uno de los *Stakeholders*, se realizó una evaluación cualitativa de interesados bajo el modelo de Poder + Interés (P+I), con el fin de clasificarlos y agruparlos por su nivel de autoridad y compromiso con el Trabajo de Grado. Se tuvo en cuenta aspectos económicos, sociales y políticos como se presenta en la **Tabla 48**.

Tabla 48. Análisis de Stakeholders Poder + Interés

ID	Stakeholders	Poder			Interés				P+I
		Influencia	Control	P	Técnico	Económico	Social	I	
		60%	40%		40%	40%	20%		
S-01	Director del Trabajo de Grado: Ing. Germán Eduardo Giraldo González	5	4	4.6	5	4	4	4.4	9.0
S-02	Gerente del Trabajo de Grado: Ing. María Angélica Ayala Betancourt	5	5	5.0	5	5	5	5.0	10.0
S-03	Equipo de Trabajo de Grado: Ing. María Ayala, Ing. Nancy Amaya, Ing. Rafael Doncel, Ing. Oscar Sarmiento.	4	4	4.0	5	5	5	5.0	9.0
S-04	Miembros del Comité Trabajo de Grado - Unidad de Proyectos Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	3	4	3.4	4	4	4	4.0	7.4
S-05	Jurados	4	5	4.4	5	1	2	2.8	7.2
S-06	Asesor del Trabajo de Grado: Ing. Angélica Sarmiento.	4	3	3.6	5	1	2	2.8	6.4
S-07	Asesor Estadístico: Ing. Iván Mendivelso.	3	3	3.0	5	1	2	2.8	5.8
S-08	Aristizábal et al., (2017).	3	1	2.2	4	2	2	2.8	5.0
S-09	Revistas Especializadas	2	1	1.6	2	2	2	2.0	3.6
S-10	Empresa del sector de la construcción.	1	4	2.2	4	5	3	4.2	6.4
S-11	Familias de los integrantes del equipo de Trabajo de Grado.	3	1	2.2	2	2	5	2.6	4.8

Fuente: Los autores

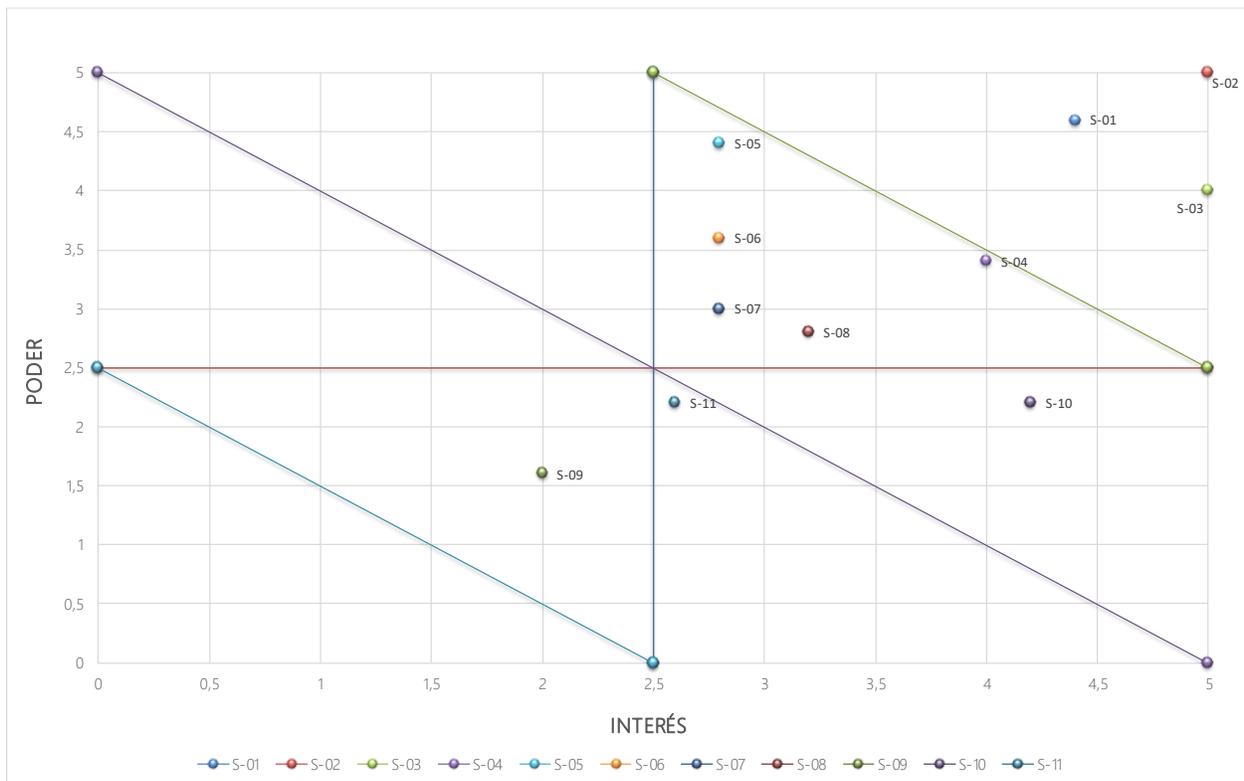
La **Ilustración 18**, muestra la prioridad de atención de cada uno de los *Stakeholders* y las estrategias genéricas que se deben implementar según el caso, dichas estrategias se establecen teniendo en cuenta los resultados cuantitativos de la evaluación de los *Stakeholders* (P+I), resultados que se analizan de acuerdo a la escala de prioridad de calificación de *Stakeholders* expuesta en la **Tabla 49**.

Tabla 49. Escala de prioridad de calificación de *Stakeholders*

Prioridad	P+I	Descripción	Estrategia Genérica
P1	$7.5 < P + I$	Alto Poder + Alto Interés	Manejar de cerca
P2	$5.0 < P + I < 7.5$	Alto Poder + Bajo Interés	Mantener satisfechos
P3	$2.5 < P + I < 5.0$	Bajo Poder + Alto Interés	Mantener informados
P4	$0.0 < P + I < 2.5$	Bajo Poder + Bajo Interés	Hacer Seguimiento

Fuente: Los autores

Ilustración 18. Clasificación de *Stakeholders*



Fuente: Los autores

9.2.5. Estrategias de manejo de *Stakeholders*

Teniendo en cuenta los puntajes obtenidos con el modelo P+I, y de acuerdo a la clase y actitud identificada de cada una de las partes, se determinó el nivel de prioridad y se generaron las estrategias de manejo genéricas, descritas en la **Tabla 50**, además de realizar el registro de necesidades y expectativas de los interesados.

Tabla 50. Registro de *Stakeholders*

ID	Nombre	Clase	Actitud	P+I	Estrategia Genérica	Necesidades	Expectativas
S-01	Director del Trabajo de Grado: Ing. Germán Eduardo Giraldo González	Interno	Partidario	9.0	Manejar de cerca	Lograr junto al equipo un Trabajo de Grado con altos niveles de calidad, que cumpla con los lineamientos establecidos y haga uso adecuado del conocimiento obtenido a través de la especialización.	
S-02	Gerente del Trabajo de Grado: Ing. María Angélica Ayala Betancourt	Interno	Líder	10.0	Manejar de cerca	Realizar seguimiento y control adecuado para lograr el éxito del trabajo de grado.	Lograr que el Trabajo de Grado sea reconocido como el mejor de la cohorte 05.
S-03	Equipo de Trabajo de Grado: Ing. María Ayala, Ing. Nancy Amaya, Ing. Rafael Doncel, Ing. Oscar Sarmiento.	Interno	Líder	9.0	Manejar de cerca	Realizar todas las tareas asignadas correspondientes al trabajo de grado de manera oportuna y con calidad.	Lograr que el Trabajo de Grado sea reconocido como el mejor de la cohorte 05, obteniendo el título de Maestría en septiembre de 2018.

ID	Nombre	Clase	Actitud	P+I	Estrategia Genérica	Necesidades	Expectativas
S-04	Miembros del Comité Trabajo de Grado -Unidad de Proyectos Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	Interno	Neutral	7.4	Mantener Informado	Verificar que la propuesta de trabajo de grado cumpla con los requerimientos establecidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería.	Que los trabajos de grado terminen en el tiempo y alcance planeados.
S-05	Jurados	Interno	Neutral	7.2	Mantener Informado	Verificar que el trabajo de grado cumpla con los lineamientos establecidos por la unidad de proyectos.	Que el trabajo de grado cumpla con el objetivo general y los objetivos específicos planteados en la propuesta presentada.
S-06	Asesor del Trabajo de Grado: Ing. Angélica Sarmiento.	Externo	Partidario	6.4	Manejar de cerca	Aportar el conocimiento técnico y especializado requerido por los estudiantes para desarrollar el trabajo de grado.	Que con los resultados del trabajo de grado se pueda aportar conocimiento a la línea de investigación de secuenciación de proyectos.
S-07	Asesor Estadístico: Ing. Iván Mendivelso.	Externo	Inconsciente	5.8	Manejar de cerca	Asesorar y apoyar el diseño y corrida experimental del trabajo de grado.	Obtener resultados satisfactorios que permitan dar solución al problema planteado.
S-08	Aristizábal et al., (2017).	Externo	Neutral	5.0	Mantener Informado	Continuar con el desarrollo de las recomendaciones y trabajo futuro planteado en el	Aportar para la continuidad del trabajo realizado en la Fase I.

ID	Nombre	Clase	Actitud	P+I	Estrategia Genérica	Necesidades	Expectativas
						trabajo de grado ejecutado en la fase I de la línea de investigación.	
S-09	Revistas Especializadas	Externo	Inconsciente	3.6	Hacer Seguimiento	Publicar el resultado de investigaciones enfocadas en el área de gestión de tiempo de los proyectos y asignación de recursos en la programación de multi-proyectos.	Aumento en investigaciones que resuelvan el problema de programación de multi-proyectos (RCMPSP), con el fin de realizar mayores publicaciones.
S-10	Empresa del sector de la construcción.	Externo	Neutral	6.4	Mantener Informado	Asignar eficazmente los recursos en el ambiente multi-proyectos	Aplicar el modelo heurístico en sus proyectos
S-11	Familias de los integrantes del equipo de Trabajo de Grado.	Externo	Inconsciente	4.8	Mantener Informado	Apoyar a los integrantes del equipo de trabajo de grado en el cumplimiento de los logros de la Maestría en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos	Que los integrantes del equipo de grado obtengan su título de maestría y así mejorar las condiciones de vida.

Fuente: Los autores

9.2.6. Plan de gestión de *Stakeholders*

Teniendo en cuenta la clasificación y evaluación de los *Stakeholders*, y después de la generación de estrategias genéricas, se procede a establecer las estrategias específicas que permitirán gestionar la actitud actual de los interesados y establecer la actitud deseada a la que se pretende llegar o mantener, en la **Tabla 51** y **Tabla 52**, se pueden observar las estrategias específicas que permitirán realizar una adecuada gestión de los *Stakeholders*.

Tabla 51. Diagrama Plan de Gestión de los Stakeholders

ID	Stakeholder	Inconsciente	Opositor	Neutral	Partidario	Lider
S-01	Director del Trabajo de Grado				A → D	D
S-02	Gerente del Trabajo de Grado					A D
S-03	Equipo de Trabajo de Grado					A D
S-04	Unidad de Proyectos ECI - Comité Evaluador.			A → D		
S-05	Jurados			A → D		
S-06	Asesor del Trabajo de Grado				A D	
S-07	Asesor Estadístico	A → D				
S-08	Aristizábal González et al. (2017).			A → D		
S-09	Revistas Especializadas	A → D				
S-10	Empresa del sector de la construcción.			A → D		
S-11	Familias de los integrantes del equipo de Trabajo de Grado.	A → D				

Fuente: Los autores

Tabla 52. Plan de Gestión de los *Stakeholders*

ID	Stakeholders	Clase	Actitud		Estrategia Genérica	Estrategia Específica
			Actual	Deseada		
S-01	Director del Trabajo de Grado: Ing. Germán Eduardo Giraldo González	Interno	Partidario	Líder	Manejar de cerca	Enviar información periódicamente con los diferentes avances, realizar reuniones quincenales y poder recibir las respectivas observaciones y sugerencias.
S-02	Gerente del Trabajo de Grado: Ing. María Angélica Ayala Betancourt	Interno	Líder	Líder	Manejar de cerca	Planear reuniones quincenales con el fin de realizar seguimiento y control sobre las actividades asignadas a cada miembro del equipo.
S-03	Equipo de Trabajo de Grado: Ing. María Ayala, Ing. Nancy Amaya, Ing. Rafael A. Doncel V, Ing. Oscar Sarmiento.	Interno	Líder	Líder	Manejar de cerca	Realizar reuniones semanales con el fin de mantener actualizada la información y registro de avances del Trabajo de Grado.
S-04	Miembros del Comité Trabajo de Grado -Unidad de Proyectos Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	Interno	Neutral	Partidario	Mantener Informado	Reunirse con cada uno de los miembros del Comité y apropiarse de las recomendaciones hechas frente a la propuesta de grado.

ID	Stakeholders	Clase	Actitud		Estrategia Genérica	Estrategia Específica
			Actual	Deseada		
S-05	Jurados	Interno	Neutral	Partidario	Mantener Informado	Mantener informados a los jurados durante el desarrollo del trabajo de grado atendiendo los entregables académicos
S-06	Asesor del Trabajo de Grado: Ing. Angélica Sarmiento.	Externo	Partidario	Partidario	Manejar de cerca	Enviar información periódicamente con los diferentes avances, realizar reuniones quincenales y poder recibir las respectivas observaciones y sugerencias.
S-07	Asesor Estadístico: Ing. Iván Mendivelso.	Externo	Inconsciente	Partidario	Manejar de cerca	Involucrarlo e informarlo de los objetivos de trabajo de grado y del alcance propuesto.
S-08	Aristizábal et al., (2017).	Externo	Neutral	Partidario	Mantener Informado	Informar de los resultados del trabajo de grado.
S-09	Revistas Especializadas	Externo	Inconsciente	Partidario	Hacer Seguimiento	Hacer contacto y presentar la propuesta del artículo buscando su publicación.
S-10	Empresa del sector de la construcción.	Externo	Neutral	Partidario	Mantener Informado	Informar el resultado de la identificación y caracterización del caso y exponer los beneficios que puede lograr con los resultados obtenidos en el trabajo de grado.
S-11	Familias de los integrantes del equipo de Trabajo de Grado.	Externo	Inconsciente	Neutral	Mantener Informado	Integrar a los miembros de las familias a los espacios sociales con el equipo de trabajo.

Fuente: Los autores

9.3. PLANEACIÓN

La planeación desarrolla los procesos asociados a las áreas de conocimiento: integración, alcance, tiempo, costo, calidad, recursos, comunicaciones, riesgos y *Stakeholders*.

9.3.1. Documentación de requerimientos y matriz de trazabilidad

En la **Tabla 53**, **Tabla 54**, **Tabla 55** y **Tabla 56** se relacionan los requerimientos identificados de los *Stakeholders* anteriormente analizados.

Tabla 53. Requerimientos del Negocio

COD	Requerimientos del Negocio	Stakeholders Solicitantes	$\Sigma(P+I)$
RNE001	El trabajo de grado debe contribuir al incremento de la producción de Investigación e Innovación (I+i) que responda a las necesidades del entorno.	S-01, S-09	14.4
RNE002	El trabajo de grado debe contribuir con el desarrollo de una segunda fase en la línea de secuenciación de proyectos del grupo de investigación del Centro de Estudios en Desarrollo y Gerencia integral de Proyectos (CEDGIP) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	S-01	9.0

Fuente: Los autores

Tabla 54. Requerimientos del Proyecto y Gerencia

COD	Requerimientos del Proyecto y Gerencia	Stakeholders Solicitantes	$\Sigma(P+I)$
RGE001	Entregar el informe final el 03 de agosto de 2017.	S-01, S-02, S-03, S-05.	35.2
RGE002	Realizar el Trabajo de Grado con un presupuesto que no sobrepase los \$68.344.540.	S-02, S-03.	19.0
RGE003	Se deben realizar sustentaciones de: Anexo B, plan de gerencia y entregables académicos en las fechas establecidas por la Unidad de Proyectos.	S-01, S-02, S-03, S-04	35.4
RGE004	Realizar reuniones con el director del trabajo de Grado cada 15 días.	S-01, S-02, S-03	28.0
RGE005	Realizar ajustes y correcciones expuestas por el director.	S-01, S-02, S-03.	28.0
RGE006	Se deben realizar informes de desempeño para entregar cada 15 días al director del trabajo de grado.	S-02, S-03	19.0
RGE007	Aplicar las técnicas <i>Earned Value</i> y <i>Earned Schedule</i> en el seguimiento y control del trabajo de grado.	S-01, S-02, S-03	28.0
RGE008	Realizar las combinaciones para dos (2) y tres (3) reglas de prioridad en el programa desarrollado por Aristizábal et al., (2017), en la fase I de la línea de investigación.	S-01, S-02, S-03, S-06, S-07	40.12
RGE009	Los métodos heurísticos deberán estar soportados en literatura científica.	S-01, S-02, S-03, S-06	34.4
RGE010	Se debe documentar las lecciones aprendidas en los formatos establecidos.	S-01, S-02, S-03	28.0
RGE011	Se debe solicitar cambios de acuerdo con el procedimiento y en los formatos establecidos.	S-01, S-02, S-03	28.0

Fuente: Los autores

Tabla 55. Requerimientos del producto (Funcionales).

COD	Requerimientos funcionales	Stakeholders Solicitantes	$\Sigma(P+I)$
RFU001	Los métodos heurísticos planteados deben estar en la capacidad de evaluar el desempeño de una posible solución al problema RCMPSP.	S-01, S-02, S-03, S-06, S-07	40.2
RFU002	El producto debe estar en la capacidad de presentar la identificación y caracterización de las instancias de mayor complejidad.	S-01, S-02, S-03, S-06, S-07	40.2
RFU003	El producto debe estar en la capacidad de presentar un multi-proyecto identificado y caracterizado como instancia del sector de la construcción, que permita ser el punto de partida para la fase III de la investigación.	S-01, S-02, S-03, S-06, S-10	40.8
RFU004	El producto debe estar en la capacidad de presentar la identificación de las combinaciones de reglas de prioridad que tienen mejor desempeño.	S-01, S-02, S-03, S-06, S-07.	40.2

Fuente: Los autores

Tabla 56. Requerimientos del producto (No Funcionales).

COD	Requerimientos no funcionales	Stakeholders Solicitantes	$\Sigma(P+I)$
RNF001	El producto debe tener un libro de gerencia con los componentes de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Unidad de Proyectos.	S-01, S-02, S-03, S-05	35.2
RNF002	El producto debe cumplir con criterios de calidad, como, ortografía, presentación, redacción, diseño y estructura.	S-01, S-02, S-03, S-04, S-05	42.6
RNF003	El producto debe cumplir con las normas APA.	S-01, S-02, S-03, S-04, S-05, S-06	49.0
RNF004	El producto debe incluir un artículo corto con lineamientos establecidos por la Unidad de Proyectos.	S-01, S-02, S-03, S-04, S-05, S-06	49.0
RNF005	El producto debe incluir un póster corto con lineamientos establecidos por la Unidad de Proyectos.	S-01, S-02, S-03, S-04, S-05, S-06	49.0

Fuente: Los autores

En la **Tabla 57** se establece la Matriz de Trazabilidad, la cual relaciona los requerimientos identificados con su origen y su relación con los entregables de la WBS.

Tabla 57. Matriz de Trazabilidad

MATRIZ DE TRAZABILIDAD					
REQUERIMIENTOS DE NEGOCIO					
COD	Requerimiento	P+I	Se relaciona con:	Se satisface con:	
			Necesidad o Expectativa	Elemento WBS	Prueba
RNE001	El trabajo de grado debe contribuir al incremento de la producción de Investigación e Innovación (I+i) que responda a las necesidades del entorno.	14.4	Incrementar el número de trabajos de investigación generados desde la Unidad de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	2.2.1	Concepto de Aprobación de los Jurados
RNE002	El trabajo de grado debe contribuir con el desarrollo de una segunda fase en la línea de secuenciación de proyectos del grupo de investigación del Centro de Estudios en Desarrollo y Gerencia integral de Proyectos (CEDGIP) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	9.0	Contribuir con una propuesta de solución al problema RCMPSP.	2.2.1	Concepto del Director de Trabajo de Grado y Asesor Técnico

Fuente: Los autores

Tabla 57. (Continuación)

MATRIZ DE TRAZABILIDAD					
REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO Y GERENCIA					
COD	Requerimiento	P+I	Se relaciona con:	Se satisface con:	
			Necesidad o Expectativa	Elemento WBS	Prueba
RGE001	Entregar el informe final el 03 de agosto de 2017.	35.2	Cumplir con las fechas establecidas por la Unidad de proyectos para la presentación del informe final con el fin de obtener el título en la fecha programada por la Escuela Colombiana de Ingeniería	2.1.3	Recibido de la Unidad de Proyectos
RGE002	Realizar el Trabajo de Grado con un presupuesto que no sobrepase los \$ 68.344.540.	19.0	No sobrepasar el presupuesto planeado para la ejecución del Trabajo de Grado	1	Informe final de seguimiento al presupuesto
RGE003	Se deben realizar sustentaciones de: Anexo B, plan de gerencia y entregables académicos en las fechas establecidas por la Unidad de Proyectos.	35.4	Hacer pública la presentación de la propuesta, plan de gerencia e informe final con el fin de recibir las observaciones, sugerencias y comentarios que enriquezcan el trabajo y por supuesto lo direccionen para terminarlo con éxito	2.1.1.4 2.1.2.4 2.1.3.2	Concepto de Jurados, director y Profesores de la Unidad de Proyectos
RGE004	Se deben realizar informes de desempeño para entregar cada 15 días al director del trabajo de grado.	28.0	Realizar seguimiento y control para garantizar la finalización exitosa del proyecto.	2.1.3.5	Actas de reunión
RGE005	Realizar ajustes y correcciones expuestas por el director.	28.0	Realizar seguimiento y control para garantizar la finalización exitosa del proyecto.	2.1.3.5	Entregas corregidas
RGE006	Hacer informes de desempeño cada 15 días.	19.0	Realizar seguimiento y control para garantizar la finalización exitosa del proyecto.	2.4.1	Informes de desempeño

MATRIZ DE TRAZABILIDAD						
REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO Y GERENCIA						
COD	Requerimiento	P+I	Se relaciona con:		Se satisface con:	
			Necesidad o Expectativa		Elemento WBS	Prueba
RGE007	Aplicar las técnicas <i>Earned Value</i> y <i>Earned Schedule</i> en el seguimiento y control del trabajo de grado.	28.0	Realizar seguimiento y control adecuado para lograr el éxito del trabajo de grado.		2.1.3.1	Informes de desempeño
RGE008	Realizar las combinaciones para dos (2) y tres (3) reglas de prioridad en el programa desarrollado por Aristizábal et al.. (2017), en la fase I de la línea de investigación.	40.12	Evaluar el desempeño de los métodos heurísticos seleccionados de acuerdo a las medidas de desempeño e instancias seleccionadas.		2.2.1.2	Concepto del Director de Trabajo de Grado y Asesor Técnico
RGE009	Los métodos heurísticos deberán estar soportados en literatura científica.	34.4	La investigación parta de una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) que la valide.		2.1.2.5	Revisión por parte del director del trabajo de grado de la RSL.
RGE010	Se debe documentar las lecciones aprendidas en los formatos establecidos.	28.0	Registrar las lecciones aprendidas durante el desarrollo del trabajo de grado con el fin de prevenir posibles atrasos en tiempo y costo.		2.4.4.	Registro de las lecciones aprendidas
RGE011	Se debe solicitar cambios de acuerdo con el procedimiento y en los formatos establecidos.	28.0	Se realizarán las solicitudes de cambios en caso de ser estrictamente necesario.		2.4.4	Registro de solicitudes de cambio.

Fuente: Los autores

Tabla 57. (Continuación)

MATRIZ DE TRAZABILIDAD					
REQUERIMIENTOS FUNCIONALES					
COD	Requerimiento	P+I	Se relaciona con:	Se satisface con:	
			Necesidad o expectativa	Elemento o WBS	Prueba
RFU001	Los métodos heurísticos planteados deben estar en la capacidad de evaluar el desempeño de una posible solución al problema RCMPSP.	40.2	Contribuir con una propuesta de solución al problema RCMPSP.	2.3.4	Concepto del Director de Trabajo de Grado y Asesor Técnico
RFU002	El producto debe estar en la capacidad de presentar la identificación y caracterización de las instancias de mayor complejidad.	40.2	Tener en cuenta para futuras investigaciones redes de programación de mayor complejidad.	2.3.5	Concepto del Director de Trabajo de Grado y Asesor Técnico
RFU003	El producto debe estar en la capacidad de presentar un multi-proyecto del sector de la construcción, identificado y caracterizado como instancia, que permita ser el punto de partida para la fase III de la investigación.	40.8	Aportar a una futura investigación en donde se aplique el método de solución propuesto en el presente trabajo a un multi-proyecto real.	2.3.6	Concepto del Director de Trabajo de Grado y Asesor Técnico
RFU004	El producto debe estar en la capacidad de presentar la identificación de las combinaciones de reglas de prioridad que tienen mejor desempeño.	40.2	Evaluar el desempeño de los métodos heurísticos seleccionados de acuerdo a las medidas de desempeño e instancias seleccionadas.	2.3.7	Concepto del Director de Trabajo de Grado y Asesor Técnico

Fuente: Los autores

Tabla 57. (Continuación)

MATRIZ DE TRAZABILIDAD					
REQUERIMIENTOS NO FUNCIONALES					
COD	Requerimiento	P+I	Se relaciona con:	Se satisface con:	
			Necesidad o expectativa	Elemento WBS	Prueba
RNF001	El producto debe tener un libro de gerencia con los componentes de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Unidad de Proyectos.	35.2	Cumplir con los lineamientos establecidos por el Comité de trabajos de grado.	2.4.5	Aprobación del Trabajo de Grado.
RNF002	El producto debe cumplir con criterios de calidad, como, ortografía, presentación, redacción, diseño y estructura.	42.6	Cumplir con los lineamientos establecidos por la Unidad de proyectos.	2.1.3	Aprobación del Trabajo de Grado.
RNF003	El producto debe cumplir con las normas APA.	49.0	Elaborar trabajo de grado cumpliendo con las normas APA, acogiendo lo establecido por la Unidad de proyectos	2.4.1.	Aprobación del trabajo de grado
RNF004	El producto debe incluir un artículo corto con lineamientos establecidos por La Unidad de proyectos.	49.0	Elaborar artículo corto que contenga los principales resultados de la Investigación y así mismo cumpliendo con las exigencias de la Unidad de proyectos tanto en contenido como en presentación.	2.4.3.	Aprobación del artículo corto
RNF005	El producto debe incluir un póster corto con lineamientos establecidos por la Unidad de Proyectos.	49.0	Elaborar póster que contenga los principales resultados de la Investigación y así mismo cumpliendo con las exigencias de la Unidad de proyectos tanto en contenido como en presentación.	2.4.4.	Aprobación y presentación del Póster

Fuente: Los autores

9.3.2. Declaración de alcance.

DECLARACIÓN DE ALCANCE (SCOPE STATEMENT)

NOMBRE DEL TRABAJO DE GRADO:

Análisis de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP).

OBJETIVOS GERENCIALES PARA EL TRABAJO DE GRADO

El trabajo de grado tiene como propósito alcanzar los siguientes objetivos gerenciales:

- Obtener la aprobación del trabajo de grado por parte del Comité de trabajos de grado para la obtención del título de Magister.
- Entregar el informe final de trabajo de grado el 03 de agosto de 2018.
- Realizar el Trabajo de Grado con un presupuesto menor a \$ 68.344.540.
- Hacer control y seguimiento de acuerdo a las líneas base establecidas.

DESCRIPCIÓN DEL ALCANCE DEL TRABAJO DE GRADO

El Trabajo de Grado comprende la labor que debe realizarse para lograr los entregables de las fases definidas en la investigación, así:

- Fase I
 - Elaboración de la propuesta de Trabajo de Grado
 - Presentación de la propuesta de Trabajo de Grado
 - Aprobación de la propuesta de Trabajo de Grado
- Fase II
 - Plan de Gerencia
 - Sustentación del Plan de Gerencia
- Fase III
 - Informe Final del Trabajo de Grado
 - Análisis de las Combinaciones
 - Instancias de mayor complejidad identificadas y caracterizadas
 - Multi-proyecto real identificado y caracterizado como instancia
 - Sustentación del Informe Final del Trabajo de Grado
 - Libro de Gerencia
 - Entrega del documento definitivo del Trabajo de Grado
- Fase IV
 - Artículo
 - Póster

DESCRIPCIÓN DEL ALCANCE DEL PRODUCTO DEL TRABAJO DE GRADO

El documento final del Análisis de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP), debe cumplir con las siguientes características para lograr su alcance:

- Su presentación debe seguir con las normas vigentes de ICONTEC:
 - NTC1486 - Trabajo de grado.
 - NTC5613 - Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura.
 - NTC4490 - Referencias documentales para fuentes de información electrónicas.
- Su extensión debe ser no mayor a 200 paginas sin contemplar anexos y libro de gerencia.
- Su contenido debe incluir:
 - Tapas o pastas, guardas, cubierta, portada, página de aceptación, página de dedicatoria (opcional) y página de agradecimientos (opcional).
 - Contenido, listas especiales (tablas, ilustraciones, cuadros, anexos), glosario y resumen ejecutivo.
 - Cuerpo del documento: generalidades, desarrollo, conclusiones y recomendaciones generales.
 - Gerencia
 - Complementarios

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO:

A continuación, se listan los criterios que deben cumplirse para la aprobación del Trabajo de Grado:

- Aprobación por parte del Director del Trabajo de Grado y los jurados evaluadores asignado por la Unidad de Proyectos.
- La aprobación por parte de los jurados evaluadores, del informe del Trabajo de Grado de acuerdo con los criterios y fechas establecidos por la Unidad de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Al finalizar el trabajo de grado se debe presentar un modelo heurístico desarrollado a partir la combinación de dos (2) y tres (3) reglas de prioridad (PR).
- Al finalizar el trabajo de grado se deben presentar instancias de mayor complejidad caracterizadas que permitan una futura aplicación con la combinación de las reglas de prioridad.
- Al finalizar el trabajo de grado se debe presentar un multi-proyecto real en el sector de la construcción en Colombia, caracterizado como instancia que permita la futura aplicación con la combinación de las reglas de prioridad.

EXCLUSIONES DEL TRABAJO DE GRADO

- No se va a realizar en este Trabajo de Grado la aplicación del método heurístico desarrollado en la instancia caracterizada del multi-proyecto real.
- Las instancias de complejidad baja, media y alta sólo se caracterizarán, no se utilizarán para la aplicación del modelo heurístico.
- No se va a desarrollar software.

RESTRICCIONES DEL TRABAJO DE GRADO

- Los entregables que hacen parte del desarrollo del trabajo de grado deben cumplir con las fechas de entrega.
- El presupuesto total estimado para el desarrollo del trabajo de grado no podrá superar el valor de \$ 68.344.540.
- El tiempo asignado para asesorías de dirección no podrá superar las cuarenta (40) horas y además se tendrá un máximo de diez (10) horas de asesorías para el desarrollo del Trabajo de Grado.

SUPUESTOS DEL TRABAJO DE GRADO

- Acceso a la información de programación en un proyecto real del sector de la construcción en Colombia.
- Acceso al software desarrollado en la Fase I por Aristizábal et al., (2017).
- Acceso al generador de instancias de RCMPSP desarrollado por (Browning & Yassine, 2010).
- Acceso a la información de algunos autores correspondiente a modelos heurísticos.
- Los cuatro estudiantes que conforman el grupo se mantendrán unidos hasta la culminación del Trabajo de Grado.
- El director del Trabajo de Grado asignado brindará su apoyo en el desarrollo del Trabajo de Grado hasta su culminación.
- No cambiarán las normas y especificaciones requeridas por la Unidad de Proyectos para la presentación del Trabajo de Grado.
- Se mantendrá el apoyo institucional durante el desarrollo del Trabajo de Grado.

Aprobado y aceptado por:

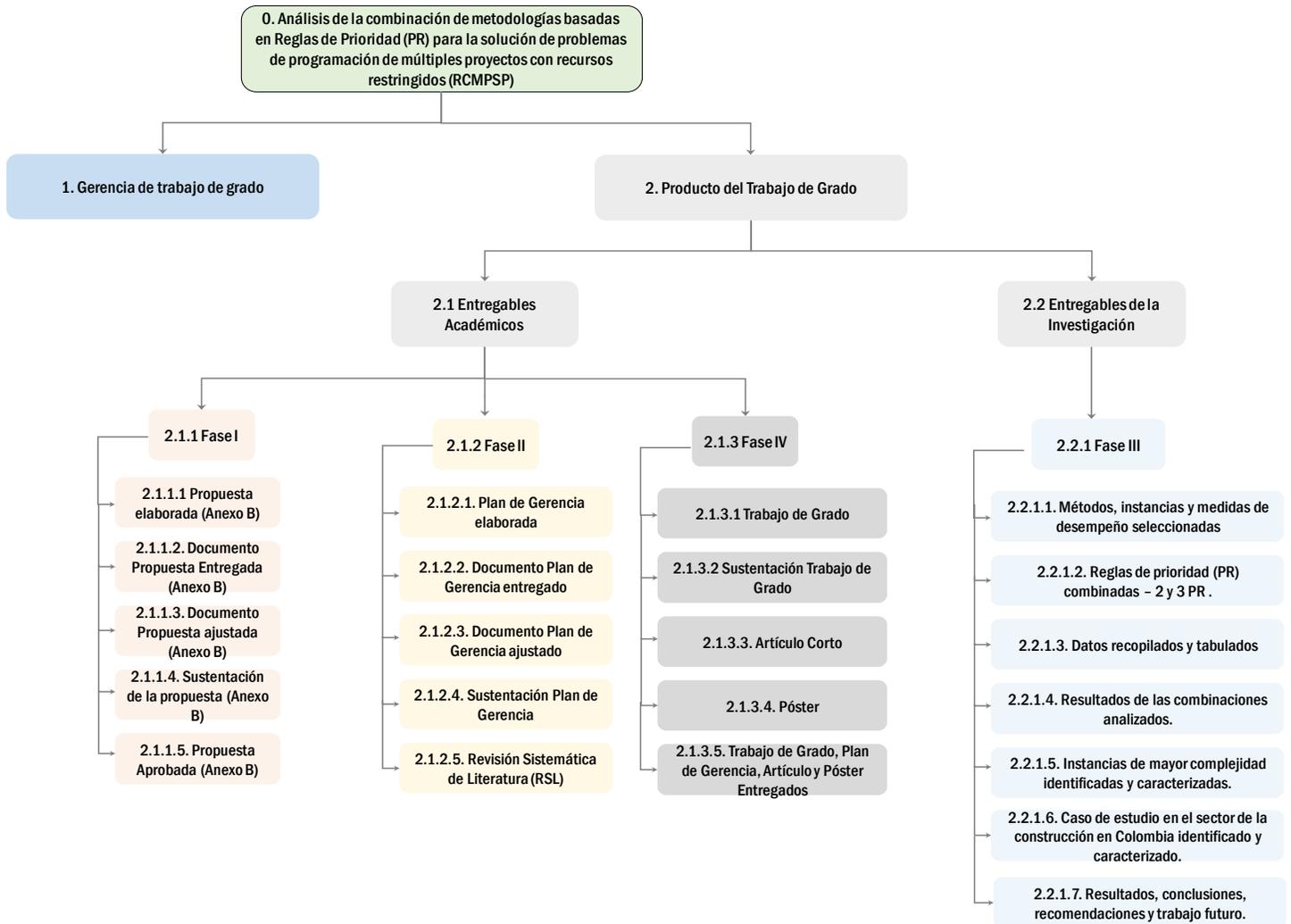
Ing. Germán Eduardo Giraldo
Director del Trabajo de Grado

Ing. María Angélica Ayala B
Gerente del Trabajo de Grado

9.3.3. WBS: estructura de Desglose del Trabajo de Grado.

Luego de identificar los requerimientos de los *Stakeholders*, en la **Ilustración 19** se plantea la estructura de desglose de trabajo que responde a los requerimientos a través de entregables.

Ilustración 19. WBS del Trabajo de Grado



Fuente: Los autores

Diccionario de la WBS

En la **Tabla 58**, se describe en detalle cada uno de los componentes de la WBS (**Ilustración 19**), así como sus elementos dependientes y la unidad organizacional que responde a cada entregable.

Tabla 58. Diccionario de la WBS del Trabajo de Grado

DICcionario DE LA WBS						
Nive I	Códig o WBS	Cuenta de Control	Nombre del elemento	Descripción del trabajo del elemento	Elementos dependiente s	Unidad organizacional responsable
1	1.	✓	Gerencia de trabajo de grado	Gerencia del Proyecto - Análisis de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP)	N/A	Gerente de Trabajo de Grado
1	2.	X	Producto del trabajo de grado	Realizar todas las actividades del trabajo de grado necesarios para cumplir con los requerimientos del plan de gerencia y sus cambios	2.1, 2.2., 2.3. y 2.4	
2	2.1	X	Entregables Académicos		2.1.1., 2.1.2., 2.1.3	
3	2.1.1	X	Fase I	Realizar Anexo B de acuerdo con los lineamientos entregados por la Unidad de Proyectos	2.1.1.1., 2.1.1.2., 2.1.1.3., 2.1.14. y 2.1.1.5.	

DICcionario DE LA WBS						
Nive I	Código WBS	Cuenta de Control	Nombre del elemento	Descripción del trabajo del elemento	Elementos dependientes	Unidad organizacional responsable
4	2.1.1.1	✓	Propuesta Elaborada (Anexo B)	Realizar revisión preliminar de literatura, antecedentes, problema y justificación, objetivos, propósito, metodología, entregables de acuerdo a Instructivo de la Unidad de proyectos.	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.1.2.	✓	Documento Propuesta Entregada (Anexo B)	Entrega de propuesta trabajo de grado el 29 de septiembre de 2017, para revisión por parte del comité evaluador	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.1.3.	✓	Documento Propuesta Ajustado (Anexo B)	Realizar ajustes solicitados por el Comité Evaluador, asesor metodológico y director de trabajo de grado presentando documento definitivo.	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.1.4.	✓	Sustentación de la propuesta (Anexo B)	Elaboración presentación en <i>Power Point</i> de propuesta de grado, así mismo como la preparación y sustentación de la propuesta.	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.1.5.	✓	Propuesta Aprobada (Anexo B)	El Comité evaluador realiza comentarios a la propuesta de grado y aprueba propuesta	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
3	2.1.2.	X	Fase II		2.1.2.1., 2.1.2.2., 2.1.2.3., 2.1.2.4. y 2.1.2.5.	

DICCIONARIO DE LA WBS						
Nivel	Código WBS	Cuenta de Control	Nombre del elemento	Descripción del trabajo del elemento	Elementos dependientes	Unidad organizacional responsable
4	2.1.2.1.	✓	Plan de Gerencia Elaborado	Elaboración plan de gerencia del trabajo de grado aplicando los conocimientos adquiridos durante la maestría y según los lineamientos del PMI.	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.2.2.	✓	Plan de Gerencia entregado	Entrega plan de gerencia, para revisión por parte de la Unidad de proyectos	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.2.3.	✓	Documento Plan de Gerencia ajustado	Realizar ajustes solicitados por el asesor metodológico y director de trabajo de grado presentando documento definitivo.	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.2.4.	✓	Sustentación plan de Gerencia	Elaboración presentación en <i>Power Point</i> de plan de gerencia, así mismo como la preparación y sustentación del plan de gerencia	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.2.5.	✓	Revisión Sistemática de Literatura (RSL)	Realizar recopilación de literatura científica siguiendo como guía el método utilizado por (Kitchenham et al., 2009, Nianzi et al., 2016 & Keele Staff, 2007)	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
3	2.1.3.	X	Fase IV		2.1.3.1., 2.1.3.2., 2.1.3.3., 2.1.3.4. y 2.1.3.5.	

DICCIONARIO DE LA WBS						
Nive I	Código WBS	Cuenta de Control	Nombre del elemento	Descripción del trabajo del elemento	Elementos dependientes	Unidad organizacional responsable
4	2.1.3.1.	✓	Trabajo de Grado	Realizar y entregar documento trabajo de grado de acuerdo con los comentarios y correcciones del director y asesores	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.3.2.	✓	Sustentación Trabajo de Grado	Elaboración presentación en <i>Power Point</i> de trabajo de grado, así mismo como la preparación y sustentación de trabajo de grado	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.3.3.	✓	Artículo Corto	Elaboración artículo de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Unidad de proyectos	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.1.3.4.	✓	Póster	Elaboración póster de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Unidad de proyectos	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
3	2.1.3.5.	✓	Trabajo de Grado, Libro de Gerencia, Artículo y Póster	Entrega del documento definitivo revisado y aprobado por el director del Trabajo de Grado	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
2	2.2.		Entregable de la Investigación		2.2.1	
3	2.2.1	X	Fase III	Desarrollo y prueba del modelo heurístico	2.2.1.1., 2.2.1.2., 2.2.1.3., 2.2.2.4., 2.2.1.5., 2.2.1.6. y 2.2.1.7	

DICCIONARIO DE LA WBS						
Nive l	Códig o WBS	Cuenta de Control	Nombre del elemento	Descripción del trabajo del elemento	Elementos dependiente s	Unidad organizacional responsable
4	2.2.1.1.	✓	Métodos, instancias y medidas de desempeño seleccionadas	Selección de: métodos heurísticos basados en reglas de prioridad, medidas de desempeño e instancias para probar los modelos.	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.2.1.2.	✓	Reglas de prioridad (PR) combinadas - dos (2) y tres (3) PR.	Desarrollo de modelo heurísticos mediante software computacional	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.2.1.3.	✓	Datos recopilados y tabulados	Recopilar y documentar los datos recolectados	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG

Tabla 58. (Continuación)

DICCIONARIO DE LA WBS						
Nivel	Código WBS	Cuenta de Control	Nombre del elemento	Descripción del trabajo del elemento	Elementos dependientes	Unidad organizacional responsable
4	2.2.1.4.	✓	Resultados de las combinaciones analizados	Realizar análisis y evaluación de la efectividad de cada uno de los 18 heurísticos basados en reglas de prioridad identificando las de mejor desempeño, de acuerdo con diseño experimental	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.2.1.5.	✓	Instancias de mayor complejidad identificadas y caracterizadas	Estudio e identificación de redes de secuencias teniendo en cuenta la complejidad de las mismas	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.2.1.6.	✓	Multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia identificado y caracterizado como instancia	Realizar identificación y caracterización de proyecto de construcción en Colombia en donde se relacionan: características de gestión del cronograma, dependencias, actividades	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG
4	2.2.1.7.	✓	Resultados, conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.	Realizar análisis de resultados finales, desarrollando conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.	N/A	Miembros del Equipo y Gerente del TG

Fuente: Los autores

9.3.4. Línea base de tiempo (Cronograma)

A continuación, se presenta la planeación de tiempo para todas las actividades que se llevarán a cabo durante el proyecto Trabajo de Grado “*Análisis de la combinación de metodologías basadas en Reglas de Prioridad (PR) para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP)*” se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

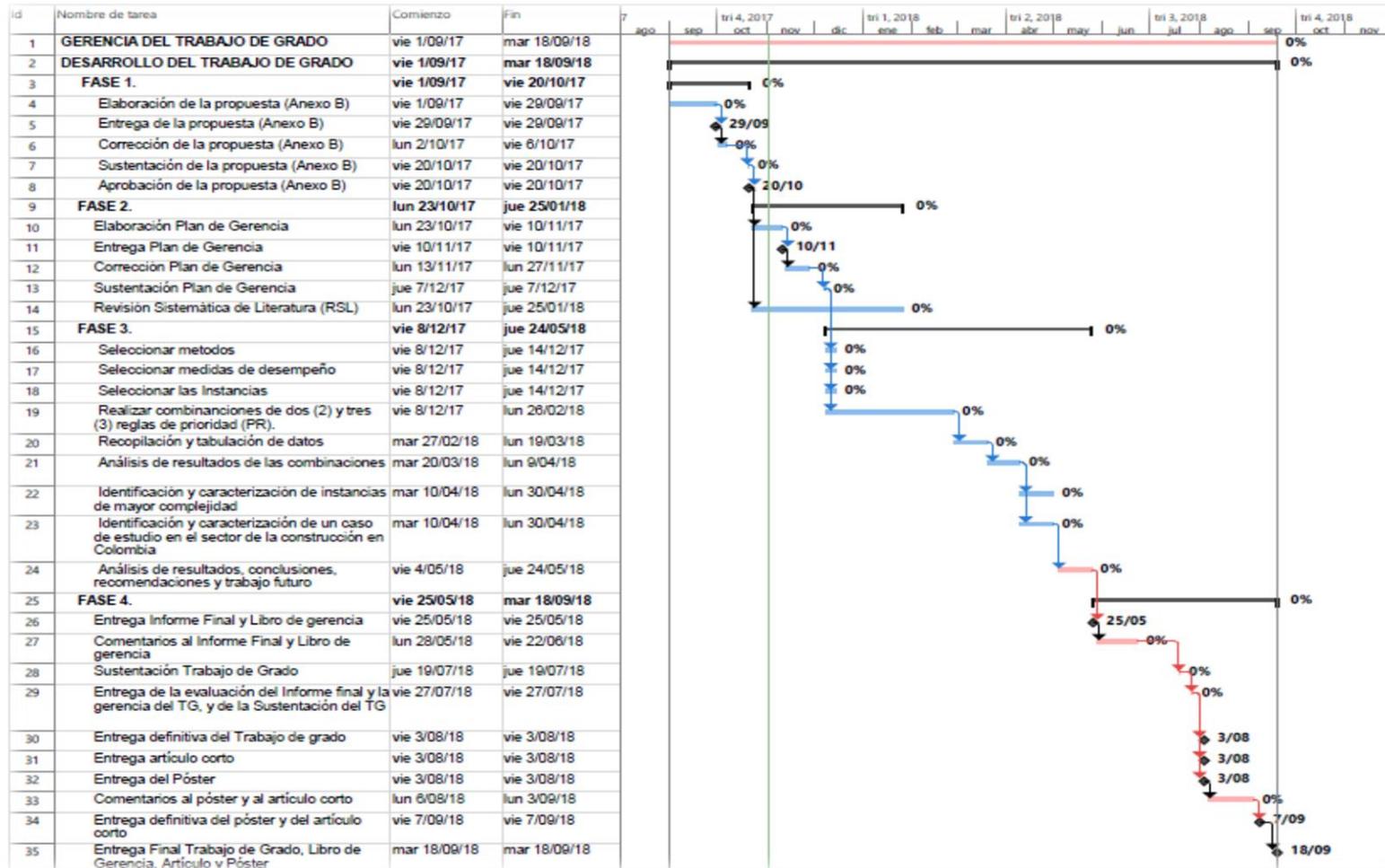
- El calendario del equipo de trabajo que participará en la elaboración del trabajo de grado será

Lunes a viernes: 7:00 pm a 10:30 pm
Sábado: 3:00 pm a 7:00 pm

- Se definieron las fechas de inicio y fin del trabajo de grado:
 - Fecha de inicio del Trabajo de Grado: 01 de septiembre de 2017.
 - Fecha de fin del Trabajo de Grado: 18 de septiembre de 2018
- Las actividades de trabajo tienen dependencia Fin a Comienzo (FC), dado que el inicio de las actividades depende de la terminación de otras.
- Dentro del cronograma se establecieron hitos como punto de referencia de los entregables de la WBS, con el fin de controlar el progreso del Trabajo de Grado.
- El cronograma fue establecido teniendo en cuenta restricciones en las fechas de los entregables académicos, dado que estos son establecidos por la Unidad de Proyectos y son inamovibles.

En la **Ilustración 20** se presenta el cronograma del trabajo de grado.

Ilustración 20. Cronograma del Trabajo de Grado



Fuente: Los autores

9.3.5. Línea base de costos (Presupuesto)

Para la estimación de costos se realizó una valoración cuantitativa de todos los recursos necesarios para llevar a cabo las actividades definidas en el cronograma del trabajo de grado, tales como los honorarios de los profesionales miembros del equipo, uso de equipos, suministros (alimentación, transporte, servicios públicos e impresiones de trabajos), y gastos asociados a los créditos académicos, como lo refleja la **Tabla 59** y **Tabla 60**.

En la Ilustración **21** se presenta la línea base de costo acumulado de todas las semanas contempladas para la realización del trabajo de grado.

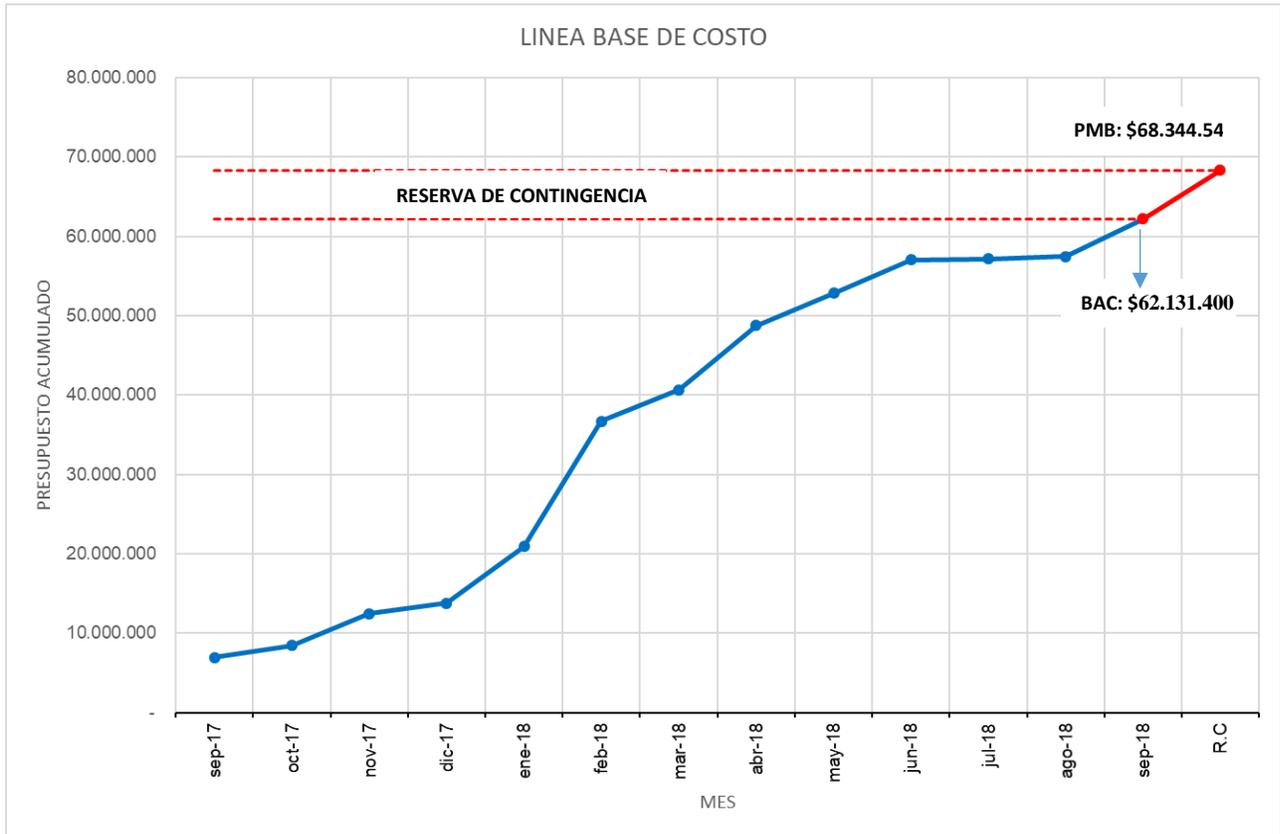
Tabla 59. Presupuesto Acumulado del Trabajo de Grado

NOMBRE DE LA TAREA	Comienzo	Fin	Presupuesto Acumulado
DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	1/09/2017	18/09/2018	\$ 68.344.540
FASE I.	1/09/2017	20/10/2017	\$ 8.448.600
Elaboración de la propuesta (Anexo B)	1/09/2017	29/09/2017	\$ 6.709.182
Entrega de la propuesta (Anexo B)	29/09/2017	29/09/2017	\$ 248.488
Corrección de la propuesta (Anexo B)	2/10/2017	6/10/2017	\$ 993.953
Sustentación de la propuesta (Anexo B)	20/10/2017	20/10/2017	\$ 248.488
Aprobación de la propuesta (Anexo B)	20/10/2017	20/10/2017	\$ 248.488
FASE 2.	23/10/2017	25/01/2018	\$ 11.285.900
Elaboración Plan de Gerencia	23/10/2017	10/11/2017	\$ 2.208.111
Entrega Plan de Gerencia	10/11/2017	10/11/2017	\$ 122.673
Corrección Plan de Gerencia	13/11/2017	27/11/2017	\$ 1.717.420
Sustentación Plan de Gerencia	7/12/2017	7/12/2017	\$ 122.673
Revisión Sistemática de Literatura (RSL)	23/10/2017	25/01/2018	\$ 7.115.024
FASE 3.	8/12/2017	24/05/2018	\$ 33.008.500
Seleccionar métodos	8/12/2017	14/12/2017	\$ 395.311

NOMBRE DE LA TAREA	Comienzo	Fin	Presupuesto Acumulado
Seleccionar medidas de desempeño	8/12/2017	14/12/2017	\$ 395.311
Seleccionar las Instancias	8/12/2017	14/12/2017	\$ 395.311
Realizar combinaciones de dos (2) y tres (3) reglas de prioridad (PR).	8/12/2017	26/02/2018	\$ 15.812.455
Recopilación y tabulación de datos	27/02/2018	19/03/2018	\$ 3.953.114
Análisis de resultados de las combinaciones	20/03/2018	9/04/2018	\$ 3.953.114
Identificación y caracterización de instancias de mayor complejidad	10/04/2018	30/04/2018	\$ 1.976.557
Identificación y caracterización como instancia de un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia	10/04/2018	30/04/2018	\$ 2.174.213
Análisis de resultados, conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	4/05/2018	24/05/2018	\$ 3.953.114
FASE 4.	25/05/2018	18/09/2018	\$ 9.388.400
Entrega Informe Final y Libro de gerencia	25/05/2018	25/05/2018	\$ 80.934
Comentarios al Informe Final y Libro de gerencia	28/05/2018	22/06/2018	\$ 4.208.593
Sustentación Trabajo de Grado	19/07/2018	19/07/2018	\$ 80.934
Entrega de la evaluación del Informe final y la gerencia del TG, y de la Sustentación del TG	27/07/2018	27/07/2018	\$ 80.934
Entrega definitiva del Trabajo de grado	3/08/2018	3/08/2018	\$ 80.934
Entrega artículo corto	3/08/2018	3/08/2018	\$ 80.934
Entrega del Póster	3/08/2018	3/08/2018	\$ 80.934
Comentarios al póster y al artículo corto	6/08/2018	3/09/2018	\$ 4.532.331
Entrega definitiva del póster y del artículo corto	7/09/2018	7/09/2018	\$ 80.934
Entrega Final Trabajo de Grado, Libro de Gerencia, Artículo y Póster	18/09/2018	18/09/2018	\$ 80.934
RESERVA DE CONTINGENCIA	01/09/17	18/09/18	\$ 6.213.140

Fuente: Los autores

Ilustración 21. Línea base de Costo



Fuente: Los autores

Tabla 60. Costos de recursos para la realización del Trabajo de Grado

RECURSOS NECESARIOS GLOBALES PARA EL TRABAJO DE GRADO																		
CANTIDADES REQUERIDAS																		
ID	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	FASE I - INICIO		FASE II PLANEACIÓN			FASE III EJECUCIÓN			FASE IV CIERRE					CANTIDAD TOTAL	
				Elaboración Anexo B	Sustentación Anexo B	Búsqueda de la Información	Plan de Gerencia TG	Sustentación Plan de Gerencia TG	Informe Final			Libro de Gerencia	Sustentación TG	Evaluación Final	Entrega Informe Final	Entrega Artículo Corto		Entrega Poster
									Análisis de Combinaciones	Instancias de Complejidad	Caso de Estudio							
1 RECURSOS HUMANOS																		
1.1	Ing. Germán Eduardo Giraldo González	Hr/Hombre	63.0	3.0	1.0	2.0	2.0	1.0	10.0	5.0	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	41
1.2	Ing. María Angélica Ayala Betancourt	Hr/Hombre	35.0	50.0	1.0	23.0	40.0	1.0	150.0	30.0	15.0	20.0	3.0	1.0	5.0	7.0	3.0	349
1.3	Ing. Nancy Johan Amaya Rodríguez	Hr/Hombre	35.0	50.0	1.0	23.0	40.0	1.0	150.0	30.0	15.0	20.0	3.0	1.0	5.0	7.0	3.0	349
1.4	Ing. Oscar Javier Sarmiento Álvarez	Hr/Hombre	35.0	50.0	1.0	23.0	40.0	1.0	150.0	30.0	15.0	20.0	3.0	1.0	5.0	7.0	3.0	349
1.5	Ing. Rafael Alexander Doncel Velasco	Hr/Hombre	35.0	50.0	1.0	23.0	40.0	1.0	150.0	30.0	15.0	20.0	3.0	1.0	5.0	7.0	3.0	349
1.6	Ps. Teresita Bernal Romero (Asesor Metodológico)	Hr/Hombre	63.0	2.0	1.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	3.0	0.0	1.0	1.0	1.0	16
1.7	Asesor Técnico (Por definir)	Hr/Hombre	63.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	5.0	3.0	3.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	14
1.8	Mán Mendivelso (Asesor Estadístico)	Hr/Hombre	63.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	5.0	3.0	3.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	20
2 MAQUINARIA Y EQUIPOS																		
2.1	Alquiler de Computadores	Hr/Hombre	2.0	200.0	4.0	92.0	160.0	4.0	600.0	120.0	60.0	80.0	12.0	4.0	20.0	28.0	12.0	1396
3 MATERIALES Y SUMINISTROS																		
3.1	Papelería + Impresión	Gl/mes	50.0	0.5	0.1	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	0.2	1.0	0.2	0.0	5
3.2	Plotter	Und	200.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1
3.3	Fotocopias	Gl/mes	50.0	0.0	0.0	1.0	0.5	0.5	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	3
3.4	Encuadernación TG	Und	140.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1
3.5	Servicio Telefónico (Celular)	Gl/mes	72.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	7
3.6	Servicio Internet	Hr	0.2	200.0	4.0	92.0	160.0	4.0	600.0	120.0	60.0	80.0	12.0	4.0	20.0	28.0	12.0	1396
3.7	Servicio Energía	\$/kWh	0.5	200.0	4.0	92.0	160.0	4.0	600.0	120.0	60.0	80.0	12.0	4.0	20.0	28.0	12.0	1396
4 INFORMATICOS																		
4.1	Compra Artículos Especializados y Libros	Gl/mes	1,000.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1
5 TRANSPORTE																		
5.1	Transporte	Día	45.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	35
TOTAL				808.5	21.1	374.5	650.0	20.7	2421.0	498.0	253.5	338.0	58.5	21.4	90.0	118.2	55.0	5728.4

Tabla 60. (Continuación)

PRESUPUESTO																		
ID	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	FASE I - INICIO		FASE II PLANEACIÓN			FASE III EJECUCIÓN			FASE IV CIERRE						VALOR TOTAL
				Elaboración Anexo B	Sustentación Anexo B	Búsqueda de la Información	Plan de Gerencia TG	Sustentación Plan de Gerencia TG	Informe Final			Libro de Gerencia	Sustentación TG	Evaluación Final	Entrega Informe Final	Entrega Artículo Corto	Entrega Poster	
									Análisis de Combinaciones	Instancias de Complejidad	Caso de Estudio							
1	RECURSOS HUMANOS																	54,593
1.1	Ing. Germán Eduardo Giraldo González	Hr/Hombre	63.0	189	63	126	126	63	630	315	189	189	189	126	126	126	126	2,583
1.2	Ing. María Angélica Ayala Betancourt	Hr/Hombre	35.0	1,750	35	805	1,400	35	5,250	1,050	525	700	105	35	175	245	105	12,215
1.3	Ing. Nancy Johan Amaya Rodríguez	Hr/Hombre	35.0	1,750	35	805	1,400	35	5,250	1,050	525	700	105	35	175	245	105	12,215
1.4	Ing. Oscar Javier Sarmiento Álvarez	Hr/Hombre	35.0	1,750	35	805	1,400	35	5,250	1,050	525	700	105	35	175	245	105	12,215
1.5	Ing. Rafael Alexander Doncoel Velasco	Hr/Hombre	35.0	1,750	35	805	1,400	35	5,250	1,050	525	700	105	35	175	245	105	12,215
1.6	Ps. Teresita Bernal Romero (Asesor Metodológico)	Hr/Hombre	63.0	126	63	0	126	0	0	0	0	315	189	0	63	63	63	1,008
1.7	Asesor Técnico (Por definir)	Hr/Hombre	63.0	0	0	0	126	0	0	315	189	189	0	0	63	0	0	882
1.8	Iván Mendivelso (Asesor Estadístico)	Hr/Hombre	63.0	0	0	0	0	0	504	315	189	189	0	0	63	0	0	1,260
2	MAQUINARIA Y EQUIPOS																	2,792
2.1	Alquiler de Computadores	Hr/Hombre	2.0	400	8	184	320	8	1,200	240	120	160	24	8	40	56	24	2,792
3	MATERIALES Y SUMINISTROS																	2,171
3.1	Papelería + Impresión	Gl/mes	50.0	25	5	0	25	10	0	0	0	50	75	10	50	10	0	260
3.2	Plotter	Und	200.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	200
3.3	Fotocopias	Gl/mes	50.0	0	0	50	25	25	0	0	50	0	0	10	0	0	0	160
3.4	Encuadernación TG	Und	140.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	0	0	140
3.5	Servicio Telefónico (Celular)	Gl/mes	72.0	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	504
3.6	Servicio Internet	Hr	0.2	30	1	14	24	1	90	18	9	12	2	1	3	4	2	209
3.7	Servicio Energía	\$/kWh	0.5	100	2	46	80	2	300	60	30	40	6	2	10	14	6	698
4	INFORMATICOS																	1,000
4.1	Compra Artículos Especializados y Libros	Gl/mes	1,000.0	0	0	500	0	0	0	0	500	0	0	0	0	0	0	1,000
5	TRANSPORTE																	1,575
5.1	Transporte	Día	45.0	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	1,575
				8,019	430	4,288	6,601	397	23,873	5,612	3,525	4,093	1,053	445	1,407	1,402	989	62,131
TOTAL																		62,131

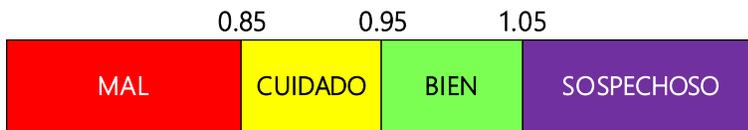
Fuente: Los autores

9.3.6. Plan de calidad: definir objetivos (métricas) de calidad, aseguramiento y control

Con el fin de verificar que los entregables del trabajo de grado cumplan con los requerimientos de alcance, tiempo y costo, el equipo del proyecto ha determinado cuatro métricas de calidad que permiten controlar los procesos de gerencia: Índice de desempeño del costo (CPI). Índice de desempeño del tiempo (SPI) Índice de desempeño del Alcance.

En la **Tabla 61** que se encuentra a continuación se presentan las métricas de calidad que se utilizarán en el trabajo de grado para poder definir sus respectivas acciones correctivas y/o preventivas que garanticen el seguimiento a las líneas bases establecidas.

Las métricas de costo y tiempo serán evaluadas de conformidad con la siguiente gráfica:



Para medir el alcance se tendrá en cuenta la siguiente gráfica



Para medir la calidad de los documentos se tendrá en cuenta la siguiente gráfica

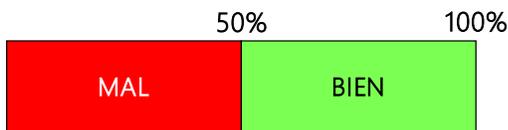


Tabla 61 Métricas de Calidad

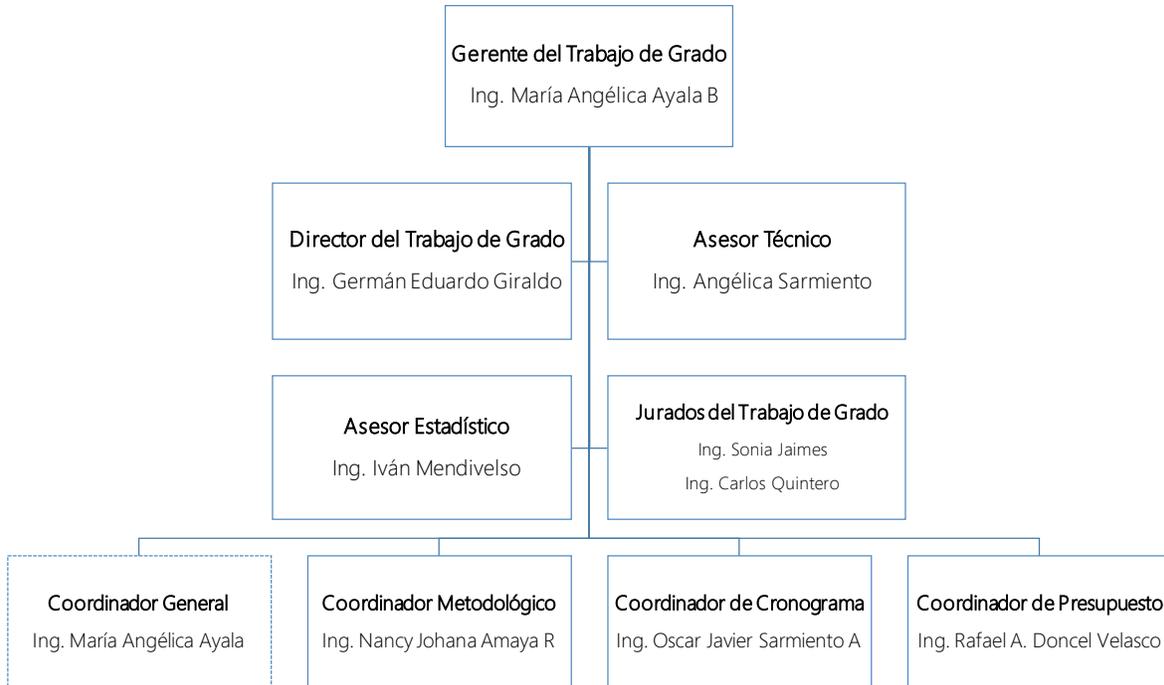
	Métrica	Objetivo	Algoritmo	Meta	Interpretación	Frecuencia	Responsable
Alcance	Porcentaje de cumplimiento	Determinar el porcentaje de cumplimiento del alcance definido para el TG.	$\% \text{ Complete} = \text{EV}/\text{BAC}$	$\% \text{ C} = 100\%$	"Se ha completado el ...% del trabajo"	Quincenal	Gerente del TG
Costo	<i>Cost Performance Index (CPI)</i>	Controlar la administración de los recursos.	$\text{CPI} (\$) = \text{EV}/\text{AC}$	$\text{CPI} = 0.95 - 1.05$	"Por cada ...peso invertido se ha creado valor de..."	Quincenal	Gerente del TG
Tiempo	<i>Schedule Performance Index (SPI)</i>	Medir y controlar las actividades del TG respecto al cronograma.	$\text{SPI} (t) = \text{ES}/\text{AT}$	$\text{SPI} = 0.95 - 1.05$	"Se ha hecho el ...% del trabajo que se debería haber hecho"	Quincenal	Gerente del TG
Calidad de los Documentos	Calidad de Documentos (CD)	Asegurar la calidad y la entrega total del Trabajo de Grado, cumpliendo con los criterios de aceptación definidos por la Unidad de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.	CD = (Entregables Aprobados / Entregables Presentados)	CD = 100%	"Los entregables presentados por la gerencia del trabajo de grado, a la fecha de revisión, han cumplido a cabalidad con los criterios definidos en la planeación"	Al finalizar cada entregable	Gerente del TG

Fuente: Los autores

9.3.7. Organigrama

La **Ilustración 22** muestra la estructura organizacional que se definió como resultado de la identificación de los cargos que se requieren para llevar a cabo el Trabajo de Grado.

Ilustración 22 Organigrama del Trabajo de Grado



Fuente: Los autores

9.3.8. Matriz de asignación de responsabilidades.

Las responsabilidades de cada miembro del equipo se han representado en una matriz RACI, ya que esta herramienta permite definir las responsabilidades de cada uno de los cargos. En la **Tabla 62** se presenta la matriz de asignación de responsabilidades para llevar a cabo el Trabajo de Grado.

A continuación, se describen las convenciones utilizadas en la matriz RACI:

Tabla 62 Convenciones Matriz RACI

	Convención	Descripción
R	<i>Responsible</i>	Persona que realiza la tarea
A	<i>Accountable</i>	Persona que responde por la tarea
C	<i>Consult</i>	Persona a quien se consulta
I	<i>Inform</i>	Persona a quien se informa

Fuente: Los autores

Tabla 63. Matriz RACI

MATRIZ DE ASIGNACIÓN DE RESPONSABILIDAD (RACI)								
Componentes WBS	Actividad	Director del Trabajo	Jurados del Trabajo de Grado	Gerente del Trabajo de Grado	Equipo del Trabajo de Grado			Asesores Técnico y Estadístico
					Coord. 1	Coord. 2	Coord. 3	
1. Gerencia del Proyecto	Gerencia del Trabajo de Grado	C		R, A	C	C	C	
2.1 FASE I	Elaboración de la propuesta (Anexo B)	C		R, A	R	R	R	
	Entrega de la propuesta (Anexo B)	C		R, A	R	C	C	
	Corrección de la propuesta (Anexo B)	C		A	C	C	C	
	Sustentación de la propuesta (Anexo B)	C		R, A	R	C	C	
	Aprobación de la propuesta (Anexo B)	C	I	A	C	C		I

Tabla 63. (Continuación)

MATRIZ DE ASIGNACIÓN DE RESPONSABILIDAD (RACI)								
Componentes WBS	Actividad	Director del Trabajo	Jurados del Trabajo de Grado	Gerente del Trabajo de Grado	Equipo del Trabajo de Grado			Asesores Técnico y Estadístico
					Coord. 1	Coord. 2	Coord. 3	
2.2 FASE II	Elaboración Plan de Gerencia	C		A	R	R	R	
	Entrega Plan de Gerencia	C		A	C	C	C	
	Corrección Plan de Gerencia	C		A	C	C	C	
	Sustentación Plan de Gerencia	C		A	C	R	C	
	Revisión sistemática de literatura (RSL)	C	I	A	R	R	R	C

Tabla 63. (Continuación)

MATRIZ DE ASIGNACIÓN DE RESPONSABILIDAD (RACI)								
Componentes WBS	Actividad	Director del Trabajo	Jurados del Trabajo de Grado	Gerente del Trabajo de Grado	Equipo del Trabajo de Grado			Asesores Técnico y Estadístico
					Coord. 1	Coord. 2	Coord. 3	
2.3 FASE III	Selección de métodos, instancias y medidas de desempeño	C		A	R	R	R	C
	Combinación de dos (2) y tres (3) reglas de prioridad (PR)	C		A	R	R	R	C
	Recopilación y tabulación de datos	C		A	R	R	R	C
	Análisis de resultados de las combinaciones	C		A	R	R	R	C
	Identificación y caracterización de instancias de mayor complejidad	C		A	R	R	R	C

Fuente: Los autores

Tabla 63. (Continuación)

MATRIZ DE ASIGNACIÓN DE RESPONSABILIDAD (RACI)								
Componentes WBS	Actividad	Director del Trabajo	Jurados del Trabajo de Grado	Gerente del Trabajo de Grado	Equipo del Trabajo de Grado			Asesores Técnico y Estadístico
					Coord. 1	Coord. 2	Coord. 3	
2.3 FASE III	Identificación y caracterización como instancia de un multi-proyecto en el sector de la construcción en Colombia	C		A	R	R	R	C
	Análisis de resultados, conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	C		A	R	R	R	C
2.4 FASE IV	Entrega Trabajo de Grado	C	I	R, A	C	C	C	I
	Sustentación Trabajo de Grado	C	I	A	R	R	R	I
	Entrega Artículo corto	C	I	A	C	C	C	I
	Entrega del Póster	C	I	R,A	C	C	C	I
	Entrega Final Trabajo de Grado, Plan de Gerencia, Artículo y Póster	C	I	R,A	C	C	C	I

Fuente: Los autores

9.3.9. Matriz de comunicaciones

La **Tabla 64** muestra la matriz de comunicaciones, la cual plantea el plan que se llevará a cabo para transmitir la información que se producirá en el desarrollo del Trabajo de Grado, donde se establece el emisor, receptor, mensaje, método y frecuencia de difusión.

Tabla 64. Matriz de comunicaciones

MATRIZ DE COMUNICACIONES DEL TRABAJO DE GRADO											
Secuencia de Comunicación			Frecuencia	Nivel de Detalle			Métodos de Difusión de la Comunicación				
Responsable de Comunicar	Receptores de Información	Información a Comunicar		Alto	Medio	Bajo	Verbal	Reunión Presencial	Escrito	E-mail	Reunión Virtual
Equipo del Trabajo de Grado.	Comité de Trabajos de grado.	Entrega: Propuesta de Trabajo de Grado.	Una Vez	x					x		
Equipo del Trabajo de Grado.	Comité de Trabajos de grado.	Observaciones, sugerencias y correcciones sobre la Propuesta de Trabajo de Grado.	Una Vez	x				x		x	
Equipo del Trabajo de Grado.	Comité de Trabajos de grado.	Sustentación: Propuesta de Trabajo de Grado.	Una Vez		x			x	x		
Equipo del Trabajo de Grado.	Director del Trabajo de Grado.	Plan de Gerencia.	Una Vez	x						x	
Director del Trabajo de Grado.	Gerente del Trabajo de Grado.	Observaciones, sugerencias y correcciones sobre el Plan de Gerencia.	Una Vez	x				x		x	
Equipo del Trabajo de Grado.	Comité y director del Trabajo de Grado	Sustentación: del Plan de Gerencia.	Una Vez		x			x	x		
Gerente y Equipo del Trabajo de Grado.	Director del Trabajo de Grado	Reuniones de seguimiento: Avances del Trabajo de Grado.	Quincenal	x				x			

Fuente: Los autores

Tabla 64. (Continuación)

MATRIZ DE COMUNICACIONES DEL TRABAJO DE GRADO											
Secuencia de Comunicación			Frecuencia	Nivel de Detalle			Métodos de Difusión de la Comunicación				
Responsable de Comunicar	Receptores de Información	Información a Comunicar		Alto	Medio	Bajo	Verbal	Reunión Presencial	Escrito	E-mail	Reunión Virtual
Gerente del Trabajo de Grado.	Director del Trabajo de Grado.	Informes de desempeño del desarrollo del Trabajo de Grado.	Quincenal	x						x	
Gerente del Trabajo de Grado.	Director del Trabajo de Grado	Dudas e inquietudes de la elaboración del Trabajo de Grado.	Quincenal		x					x	
Gerente del Trabajo de Grado.	Equipo del Trabajo de Grado	Evaluaciones de Desempeño, retroalimentación dada por asesores y Director de Trabajo de Grado.	Quincenal	x						x	x
Director del Trabajo de Grado.	Asesores del Trabajo de Grado	Solicitud de revisión y acompañamiento especializado	Mensual		x			x	x	x	
Equipo del Trabajo de Grado.	Jurados y director del Trabajo de Grado.	Entrega: Informe del Trabajo de Grado.	Una Vez	x					x		
Comité y Director de Trabajo de Grado.	Gerente y Equipo del Trabajo de Grado.	Comentarios del informe del Trabajo de Grado.	Una Vez	x					x		
Gerente y Equipo del Trabajo de Grado.	Jurados y Director de Trabajo de Grado.	Sustentación Final del Informe del Trabajo de Grado.	Una Vez	x				x	x		
Gerente y Equipo del Trabajo de Grado.	Jurados y Director de Trabajo de Grado.	Entrega Final del Informe del Trabajo de Grado.	Una Vez	x					x		

Fuente: Los autores

Tabla 64. (Continuación)

MATRIZ DE COMUNICACIONES DEL TRABAJO DE GRADO											
Secuencia de Comunicación			Frecuencia	Nivel de Detalle			Métodos de Difusión de la Comunicación				
Responsable de Comunicar	Receptores de Información	Información a Comunicar		Alto	Medio	Bajo	Verbal	Reunión Presencial	Escrito	E-mail	Reunión Virtual
Gerente y Equipo del Trabajo de Grado.	Director de Trabajo de Grado	Artículo corto	Una vez		x			x	x		
Gerente y Equipo del Trabajo de Grado	Director de Trabajo de Grado	Póster	Una vez	x				x	x		

Fuente: Los autores

9.3.10. Registro de riesgos (Identificación y respuesta)

Con el fin de determinar las variables que pueden afectar el desarrollo de la elaboración del Trabajo de Grado, se identificaron los riesgos y se desarrolló el respectivo análisis cualitativo que permitió priorizar los riesgos mediante la evaluación de probabilidad e impacto, para este análisis se usó la escala de impacto descrita en la **Tabla 65**.

Tabla 65. Escala de Impacto para la clasificación de riesgos

OBJETIVO DEL PROYECTO	IMPACTO				
	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
COSTO	Incremento de Costo Insignificante	Incremento de Costo <10%	Incremento de Costo de 10% a 20%	Incremento de Costo de 20% a 40%	Incremento de Costo >40%
TIEMPO	Desviación de <i>Schedule</i> Insignificante	Desviación de <i>Schedule</i> <5%	Desviación de <i>Schedule</i> de 5% a 10%	Desviación de <i>Schedule</i> de 10% a 20%	Desviación de <i>Schedule</i> >20%
ALCANCE	Desviación poco notoria de Alcance	Áreas menores de Alcance afectadas	Principales áreas de Alcance afectadas	Cambio de Alcance inaceptable para el cliente	Producto final del proyecto no es utilizable
CALIDAD	Degradación poco notoria de Calidad	Afectadas solo aplicaciones muy exigentes	La reducción de Calidad requiere aprobación del Cliente	La reducción de Calidad es inaceptable para el Cliente	Producto final del proyecto no es utilizable

Fuente: GUTIERREZ PACHECO, GERMAN. GESTIÓN DEL RIESGO EN PROYECTOS - Notas de clase Gestión de Riesgos en Proyectos. Enero 2016.

En la **Tabla 66**, se describe en detalle los riesgos identificados, su análisis cualitativo y posibles respuestas.

Tabla 66. Registro y Análisis de Riesgos

Registro De Riesgos Para El Trabajo De Grado				Análisis De Cualitativo				
ID Riesgo	Riesgo			Objetivos	Probabilidad	Impactos	Grado (Pxi)	Posibles Respuestas
	Causas	Eventos	Consecuencias					
R01	Retraso en el desarrollo de las actividades.	Incumplimiento del cronograma.	Demoras en la terminación de las entregas.	Alcance	BAJO	BAJO	BAJO	
				Tiempo		MUY ALTO	ALTO	Terminación de los entregables cinco días antes de la fecha de establecida en la línea base de tiempo con el fin de contar con la validaciones y realizar ajustes necesarios para entregas a tiempo.
				Costo		ALTO	MEDIO	Dedicación de horas adicionales del equipo de trabajo, para retomar el plan original.
				Calidad		BAJO	BAJO	
R02	Mal manejo de los recursos destinados al Trabajo de Grado.	Sobrecostos en el presupuesto establecido.	Cambio de la línea base de costos.	Alcance	MEDIO	BAJO	MEDIO	Evaluar causas de sobrecostos, asignar los recursos de manera estricta.
				Tiempo		BAJO	MEDIO	Solicitar cambio de línea base presupuesto con el fin de utilizar contingencia presupuestada.
				Costo		MUY ALTO	ALTO	Seguimiento y control óptimo de los costos de acuerdo a lo establecido.
				Calidad		BAJO	MEDIO	Redistribución de las responsabilidades de los miembros del equipo.
R03	Existencia de calamidad doméstica,	Ausencia de uno de los integrantes del Equipo o del	Sobrecarga a los otros miembros del Trabajo de Grado.	Alcance	ALTO	BAJO	MEDIO	

Registro De Riesgos Para El Trabajo De Grado				Análisis De Cualitativo				
ID Riesgo	Riesgo			Objetivos	Probabilidad	Impactos	Grado (Pxi)	Posibles Respuestas
	Causas	Eventos	Consecuencias					
	conflicto, viaje, incapacidad o retiro voluntario.	director del Trabajo de Grado		Tiempo		ALTO	ALTO	
			Retraso en el desarrollo de las actividades.	Costo		ALTO	ALTO	Programar actividades paralelamente con mayor inversión de tiempo.
				Calidad		MUY ALTO	ALTO	

Tabla 66. (Continuación)

Registro De Riesgos Para El Trabajo De Grado				Análisis De Cualitativo				
ID Riesgo	Riesgo			Objetivos	Probabilidad	Impactos	Grado (Pxi)	Posibles Respuestas
R04	No seguimiento de los lineamientos y entrega incompleta del informe final.	Reprobación del Trabajo de Grado	No obtención del título de especialistas.	Alcance	MUY BAJO	MUY ALTO	MEDIO	Reuniones semanales del equipo de trabajo estableciendo entregas internas que cumplan con los lineamientos y fechas establecidas por la Unidad de Proyectos Realizar seguimiento y control estricto.
			Perdidas de la inversión por los créditos reprobados	Tiempo		BAJO	BAJO	Uso eficiente de las horas de asesoría.
				Costo		BAJO	BAJO	Resolver dudas con expertos.
				Calidad		MUY ALTO	MEDIO	
R05	Robo, daño o pérdida de los equipos de cómputo.	Pérdida de la información.	Retraso en el desarrollo de las actividades.	Alcance	MEDIO	BAJO	MEDIO	Realizar copias constantes de la información en servicios de almacenamiento en la nube.
			Reproceso en la elaboración de actividades	Tiempo		ALTO	ALTO	
				Costo		MUY ALTO	ALTO	
				Calidad		ALTO	ALTO	
R06	Alguno(s) de los miembros del equipo no cumpla con las tareas propuestas	Incumplimiento del cronograma.	Demoras en la terminación de las entregas.	Alcance	MEDIO	BAJO	MEDIO	Ajuste en el cronograma. Reasignación de tareas responsabilidades y aumento de cargas de trabajo.
				Tiempo		MUY ALTO	ALTO	

Registro De Riesgos Para El Trabajo De Grado				Análisis De Cualitativo				
ID Riesgo	Riesgo			Objetivos	Probabilidad	Impactos	Grado (Pxi)	Posibles Respuestas
				Costo		ALTO	ALTO	Dedicación de tiempo adicional para retomar el plan original.
				Calidad		BAJO	MEDIO	

Tabla 66. (Continuación)

Registro De Riesgos Para El Trabajo De Grado				Análisis De Cualitativo				
ID Riesgo	Riesgo			Objetivos	Probabilidad	Impactos	Grado (Pxi)	Posibles Respuestas
R07	En el caso del director del trabajo de grado no cuente con la disposición de tiempo necesaria para la asesoría del proyecto	Se generarán actividades sin revisión adecuada	Con lo cual se pueden filtrar muchos errores que afectarán la calidad del documento	Alcance	MEDIO	MUY ALTO	ALTO	Garantizar que el director del trabajo de grado cuente con la motivación necesaria para la asesoría del proyecto.
				Tiempo		ALTO	ALTO	Cumplimiento de cada uno de los entregables en los tiempos definidos entre las partes.
				Costo		MEDIO	MEDIO	
				Calidad		ALTO	ALTO	
R08	Sí de parte de los asesores técnicos no se presenta una participación activa durante el desarrollo del trabajo de grado	no se tendrá la retroalimentación e información requerida	con lo cual se disminuirá la veracidad de la información ya que se tendría que recurrir a fuentes secundarias.	Alcance	MEDIO	ALTO	ALTO	Involucrar desde el inicio de la elaboración del trabajo de grado a cada uno de los asesores para que se cuente con una comunicación y manejo de la información de manera oportuna.
				Tiempo		ALTO	ALTO	
				Costo		MEDIO	MEDIO	
				Calidad		ALTO	ALTO	
R09	Sí no se identificó la totalidad de los requisitos del trabajo de grado en la planeación	se deberán realizar ajustes vía solicitudes de cambio durante la fase de ejecución	con lo cual se modifica el alcance del proyecto	Alcance	MEDIO	MUY ALTO	ALTO	Ajuste en el cronograma.
				Tiempo		ALTO	ALTO	
				Costo		ALTO	ALTO	Dedicación de tiempo adicional para retomar el plan original.
				Calidad		ALTO	ALTO	

Tabla 66. (Continuación)

Registro De Riesgos Para El Trabajo De Grado				Análisis De Cualitativo				
ID Riesgo	Riesgo			Objetivos	Probabilidad	Impactos	Grado (Pxi)	Posibles Respuestas
	Causas	Eventos	Consecuencias					
R10	Representantes de Empresas Constructoras deciden no suministrar información para el desarrollo del Trabajo de Grado.	Ausencia de fuente de información primaria para el desarrollo del Trabajo de Grado.	Retraso en el desarrollo de las actividades.	Alcance	BAJO	BAJO	BAJO	Mantener buenas relaciones con la organización con el cumplimiento de las estrategias de comunicación planeadas para ellos.
				Tiempo		ALTO	MEDIO	
			Reproceso en la elaboración de actividades	Costo		BAJO	BAJO	
				Calidad		MEDIO	MEDIO	

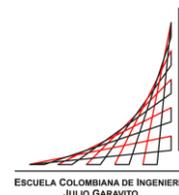
Fuente: Los autores

9.4. SEGUIMIENTO Y CONTROL

A continuación, se describen los formatos para realizar el seguimiento y control al Trabajo de Grado.

9.4.1. Formato informes de desempeño

Informe de Desempeño No. 012 22/Junio/2018



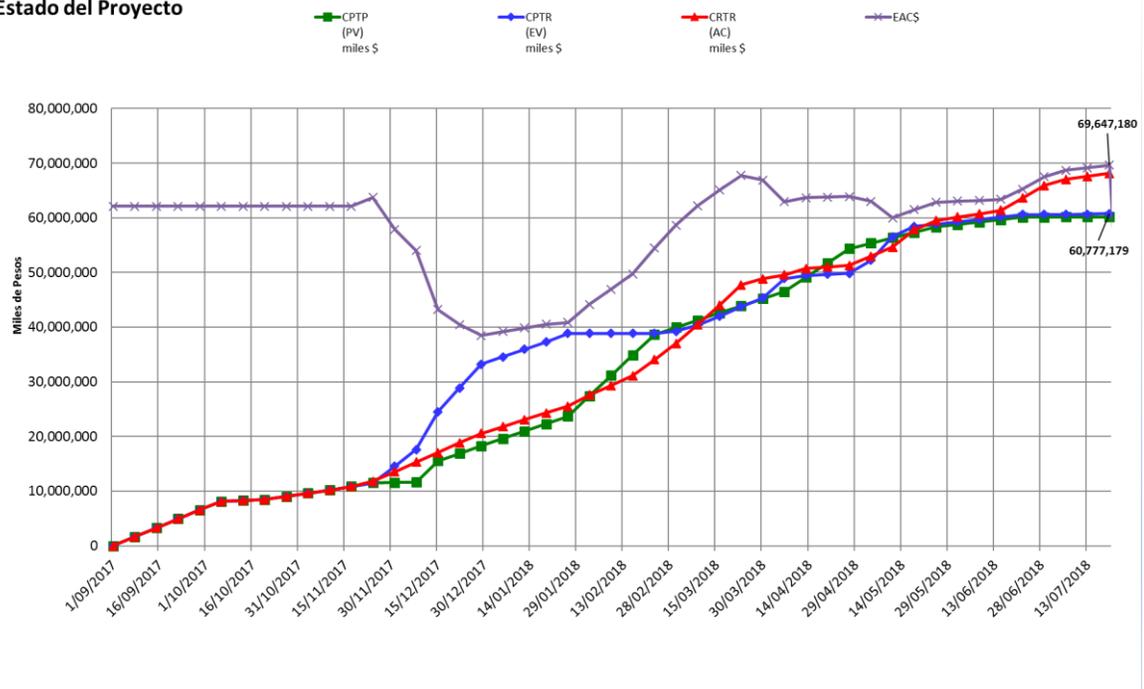
Trabajo de grado:	Análisis de la combinación de metodologías basadas en reglas de prioridad para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP).
--------------------------	--

Diagnóstico actual del estado del Trabajo de Grado		
Sigla	Nombre	Valor en la fecha de corte
BAC	Valor Planeado al Finalizar	\$62.131.362
PV	Valor Planeado	\$ 60.100.147
AC	Costo Actual	\$ 68.129.186
EV	Valor Ganado	\$ 60.777.179
SV	Variación en la Programación	\$588.714
CV	Variación en el costo	-\$7.352.007

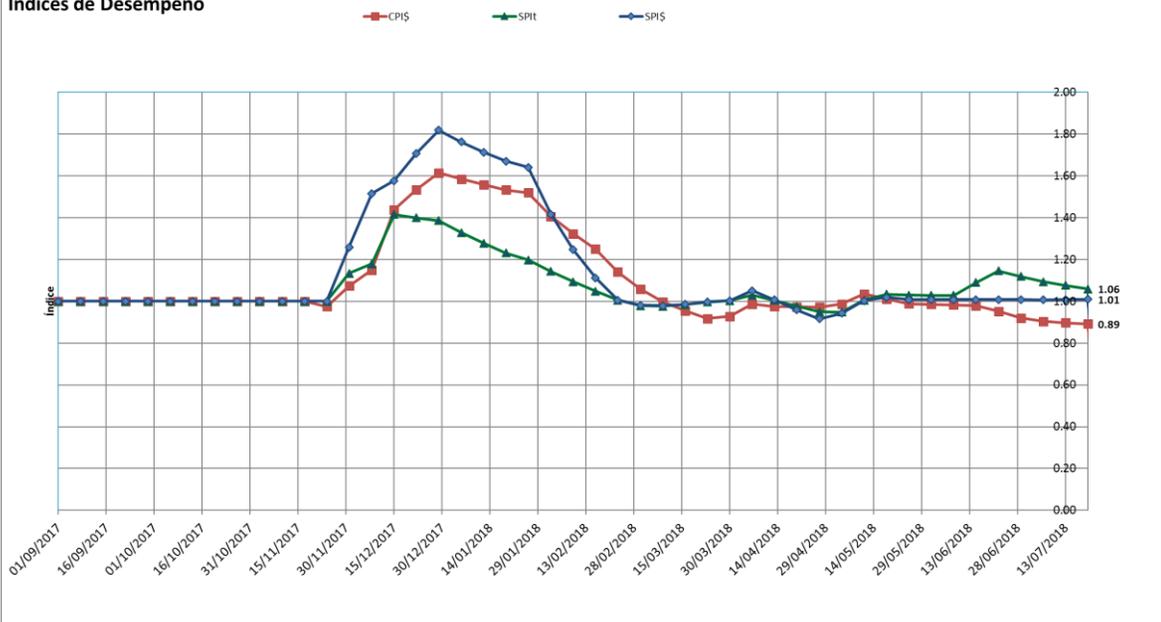
Sigla	Indicador	Resultado	Comentarios
PV%	¿Qué porcentaje del total presupuestado se ha debido realizar hasta hoy?	96.87%	- Se recibieron los comentarios al trabajo de grado por parte de cada uno de los jurados y se incluyeron y ajustaron. - Se realizó la sustentación del trabajo de Grado, en donde se obtuvo nota aprobatoria para la graduación de los miembros del equipo en Septiembre.
EV%	¿Qué porcentaje del total presupuestado se ha realizado hasta hoy?	97.82%	
AC%	¿Qué porcentaje del presupuesto total se ha gastado hasta hoy?	109.65%	
SPI	Indice de desempeño de cronograma	1.01	
CPI	Indice de desempeño de costo	0.89	

Gráfica: Earned Value Management

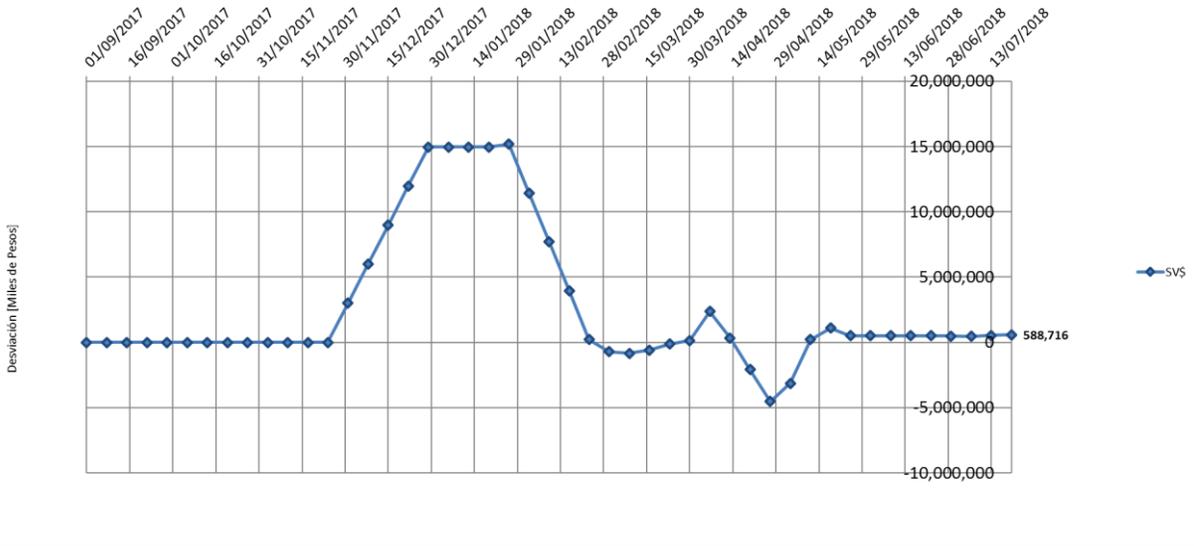
Estado del Proyecto



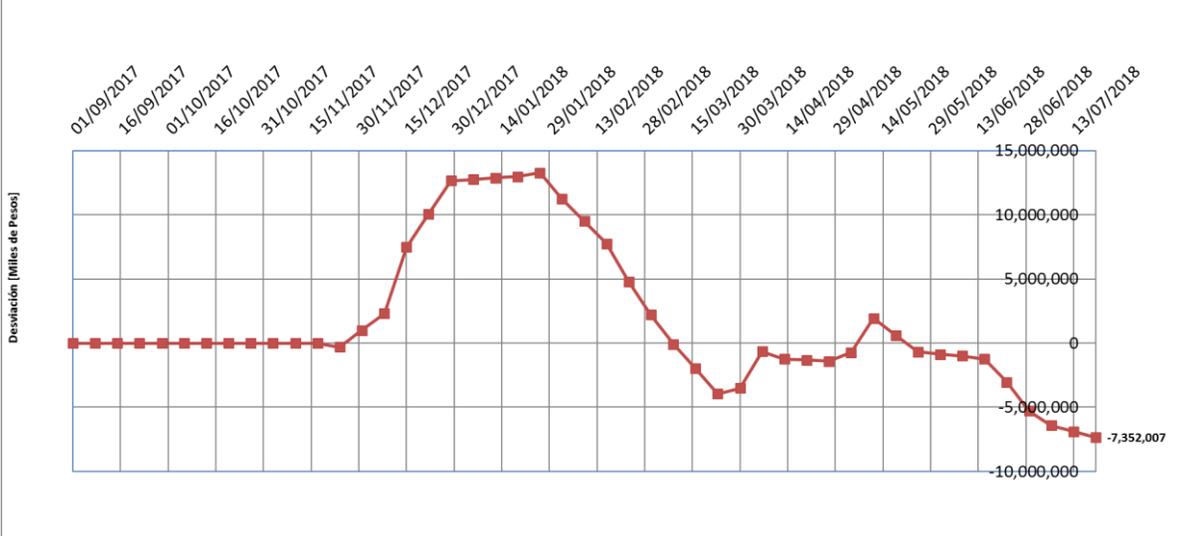
Índices de Desempeño

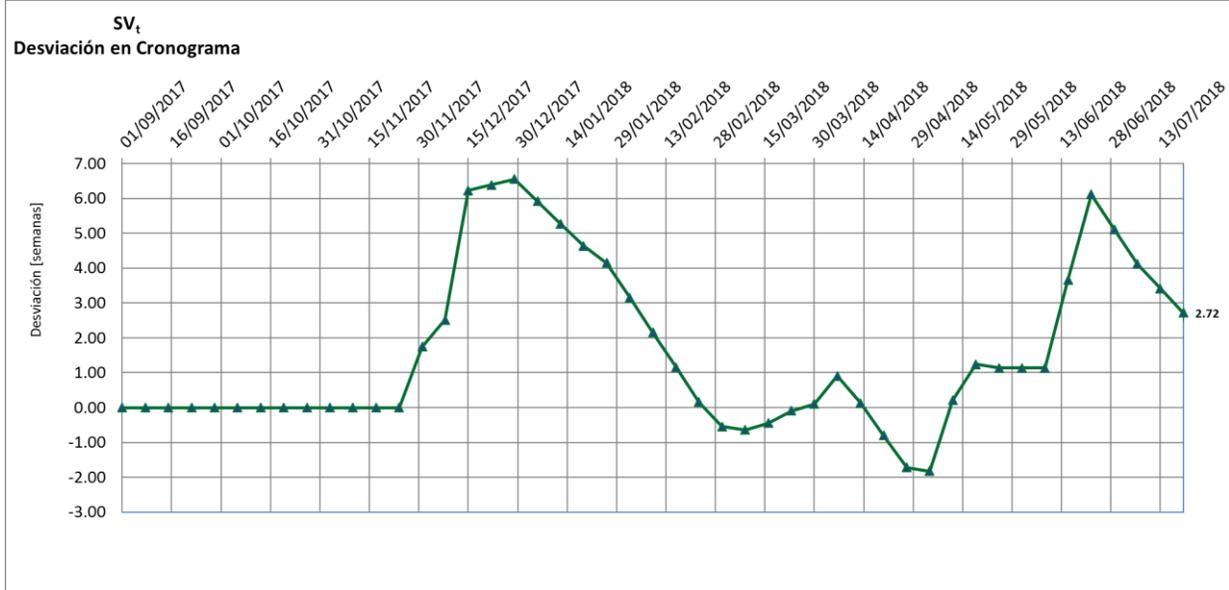


SV_s
Desviación en Alcance



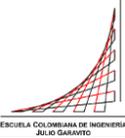
CV
Desviación en Costos





María Angélica Ayala Betancourt
Gerente del Trabajo de Grado.

9.4.2. Formato solicitudes de cambio

Solicitud de Cambios No. 000 DD/MM/AAAA				
 <small>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA JULIO GARAYTO</small>				
Solicitante (s)				
Nombre	Cargo y/o Rol			
Prioridad:				
<input type="checkbox"/> Urgente	<input type="checkbox"/> Importante	<input type="checkbox"/> Alto	<input type="checkbox"/> Medio	<input type="checkbox"/> Bajo
Descripción del cambio:				
Justificación del cambio:				
<p><i>Explique en detalle el impacto que el cambio solicitado tendrá en el proyecto, en términos de Alcance, Tiempo, Costos y Calidad:</i></p> <ul style="list-style-type: none">- Descripción del impacto.- Actividades a incluir para hacer la modificación.- Costo asociado a la implementación del cambio.- Tiempo requerido para implementar el cambio.				

Análisis del Impacto

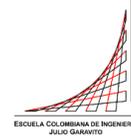
Propuesta de Solución

Información Adicional

Respuesta a la solicitud de cambios

9.4.3. Formato control y calidad

Control de Calidad del Entregable No. 000 Versión 1
DD/MM/AAAA



Trabajo de grado:	
Entregable:	

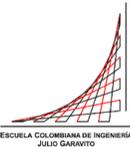
Teniendo en cuenta la siguiente escala de calificación, evaluar (Marcando con una "X") los principales aspectos del entregable al que se le está haciendo control de calidad.

Escala: Nivel de Satisfacción	
Muy Satisfecho	5
Satisfecho	4
Medianamente Satisfecho	3
Poco Satisfecho	2
Insatisfecho	1

Aspecto a Evaluar	Nivel de Satisfacción				
	1	2	3	4	5
Estructura y Contenido					
Presentación					
Cumplimiento Normas ICONTEC					
Ortografía					
Redacción					

Comentarios

9.4.4. Formato de actas de reunión

Acta de reunión No. 000 Título - DD/MM/AAAA		 <small>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAYTO</small>	
Objetivo: <ul style="list-style-type: none">•			
Logística			
Fecha y hora:		Convoca:	
Duración Estimada:		Modera:	
Lugar:		Documenta:	
Requerimientos de la reunión			
Preparación requerida: <ul style="list-style-type: none">•			
Participantes			
Nombre		Cargo y/o Rol	
Información			
A continuación, se mencionan temas de carácter informativo tratados en la reunión:			
Información			
Resumen avance del proyecto y resultados obtenidos:			
Temas tratados durante la reunión: (Problemas, logros, decisiones tomadas, acciones realizadas, inquietudes y aclaraciones).			
Temas a tratar en la próxima reunión:			
Descripción de Acuerdos			
A continuación, se describen los acuerdos establecidos en la reunión.			

Descripción de los Compromisos

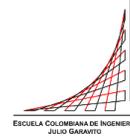
A continuación, se describen los compromisos establecidos en esta reunión (**Azul = Compromiso Cerrado, Naranja = Compromiso Pendiente, Gris = Compromiso en tiempo, Negrita = Nuevos Compromisos**)

Compromiso	Responsable	Fecha de Cierre

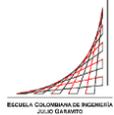
10. CIERRE

10.1. Formato aceptación

Aceptación Formal del Trabajo de Grado DD/MM/AAAA	
Nombre del Trabajo de Grado:	
Gerente del Trabajo de Grado:	
Equipo del Trabajo de grado:	
<p>Mediante el presente documento el Director del Trabajo de Grado “ _____ ”, presentado por los alumnos _____, _____ y _____, luego de realizar la revisión de la completitud y calidad del informe final, determina que el mismo cumple con los requisitos establecidos para obtener el título de Master en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos y recibe la aceptación formal y nota aprobatoria.</p> <p>_____</p> <p>Nombre: C.C: Cargo: Director de Trabajo de Grado.</p>	
OBSERVACIONES	



9.4.5. Formato lecciones aprendidas

Registro de Lecciones Aprendidas No. 000 DD/MM/AAAA	
Nombre del Trabajo de Grado	
¿Qué se hizo adecuadamente?	
¿Qué no se hizo adecuadamente?	
Causa Raíz	
Lecciones aprendidas: ¿Cómo se abordaron o deberían abordarse en el futuro los eventos del proyecto a fin de mejorar el desempeño?	
Lecciones Aprendidas	

10. BIBLIOGRAFÍA

- Acebes F, Pereda M, Poza D et al. (2015) Stochastic earned value analysis using Monte Carlo simulation and statistical learning techniques. *Int J Proj Manag*
- Adamiecki, K. (1931). "Harmonygraph" Przegląd Organizacji. *Polish Journal on Organizational*.
- Agrawal, M., Elmaghraby, S., Herroelen, W., (1996). DAGEN: A generator of testsets for project activity nets. *European Journal of Operational Research* 90, 376 – 382
- A. Mingozi, V. Maniezzo, S. Ricciardelli, and L. Bianco, (1995). "An Exact Algorithm for the Resource Constrained Project Scheduling Problem Based on a New Mathematical Formulation," *Management Science*, vol. 44, no. 5, pp. 714–729, 249, 250, 251, 256
- Anavi-Isakow, S., & Golany, B., (2003). Managing multi-project environments through constant work-in-process. *International Journal of Project Management*, 21(1), 9-18.
- Araújo, J.A., Pajares, J., & López A., (2010). Simulating the dynamic scheduling of project portfolios. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18, pp. 1428-1441
- Aristizábal, D., Castellanos, J., Ordóñez, C., (2017) Identificación y análisis de métodos heurísticos basados en reglas de prioridad para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP)
- Ballestin, F., Valls, V., & Quintanilla S., (2006). Due Dates and RCPSP. In *Perspectives in modern project scheduling*, pp. 79-104. Springer US
- Barman, S. and LaForge, R. L. (1988). Combining simple priority rules: an approach to improve the performance of a flow dominant shop. *Decision Sciences Institute proceedings, Annual Meeting, Las Vegas, USA*, 1035-1037
- Barrett, R. T. and Barman, S. (1986) A SLAM I1 simulation study of a simplified flow shop. *Simulation*, 47(5), 181-189.
- Bein, W.W., Kamburowski, J., and Stallmann, M. F. M., (1992). Optimal reduction of two-terminal directed graphs. *SIAM Journal on Computing*, 21, 1112 - 1129.
- Beşikci, U., Bilge, Ü., & Ulusoy, G., (2014). Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem. *European Journal of Operational Research*, 240(1), 22-31.

- Boctor, F.F. (1993). Heuristics for scheduling projects with resource restrictions and several resource duration modes, *International Journal of Production Research* 31, 2547–2558.
- Bouleimen, K., Lecocq, H., (2000). Multi-objective simulated annealing for the resource-constrained multi-project scheduling problem. *In: Proceedings of the 7th International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS 2000), Osnabrück, Germany, April 17–19.*
- Browning, T.R., Yassine, A.A., (2010). A random generator of resource-constrained multi-project network problems. *Journal of Scheduling* 13 (2), 143–161.
- Browning, T. R., & Yassine, A. A. (2010). Resource-constrained multi-project scheduling: Priority rule performance revisited. *International Journal of Production Economics*, 126(2), 212-228.
- Browning, T. R., & Yassine, A. A. (2016). Managing a Portfolio of Product Development Projects under Resource Constraints. *Decision Sciences*, 47(2): 333-372.
- Brucker P., Drexl A., Mohring R., Neumann K. & Pesch E., (1999)."Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models and methods", *European Journal of Operational Research*, 112, pp. 3-41
- Chaparro, V., and Castañeda, J., (2015). Ambiente multi-proyectos con recursos restringidos: una revisión del estado del arte. *Universidad distrital Francisco José de Caldas.*
- Chen, J., Zhang, D., and Zhu, J., (2014). Multi-project Scheduling Problem with Human Resources Based on Dynamic Programming and Staff Time Coefficient. *International Conference on Management Science & Engineering (21th)*
- Chiu, H.N., Tsai, D.M., (1993). A comparison of single-project and multi-project approaches in resource constrained multi-project scheduling problems. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers* 10, 171–179.
- Cohen, I., Mandelbaum, A., Shtub, A., (2004). Multi-project scheduling and control: a process-based comparative study of the critical chain methodology and some alternatives. *Project Management Journal* 35 (2), 39–50.
- Confessore, G., Giordani, S., Rismondo, S., (2007). A market-based multi-agent system model for decentralized multi-project scheduling. *Annals of Operations Research* 150 (1), 115–135.

- D. G. Malcolm, J. H. Roseboom, C. E. Clark, and W. Fazar, (1959) "Application of a technique for research and development program evaluation," *Oper. Res.*, vol. 7, no. 5, pp. 646–669
- Dalfard, V., Ranjbar, V., (2012). Multi-projects Scheduling with resource constraints & priority rules by the use of simulated annealing algorithm. *Technical Gazette* 19, 3, 493-499.
- Davis, E.W., Patterson, J.H., (1975). A comparison of heuristic and optimum solutions in resource-constrained project scheduling. *Management Science* 21 (8), 944–955.
- Deckro, R.F., Winkofsky, E.P., Hebert, J.E., Gagnon, R., (1991). A decomposition approach to multi-project scheduling. *European Journal of Operational Research* 51, 110 - 118.
- Dooley, K. J. (1990) Interactions between dispatching rules and workstation location, in *Midwest Decision Sciences Institute Proceedings, Minneapolis, Minnesota, USA*, 55-57.
- Drexl, A., (1991). Scheduling of project networks by job assignment. *Management Science* 37 (12), 1590–1602
- Drexl, A., Nissen, R., Patterson, J. H., and Salewski. F., (1997). ProGen/ π x – An instance generator for resource-constrained project scheduling problems with partially renewable resources and further extensions. *Technical report, Universitat Kiel, Germany*.
- E. Demeulemeester, B. Dodin and W. Herroelen, (1992), "A random activity network generator", *Operational Research*, 41, 5, 972-980
- E. L. Demeulemeester and W. S. Herroelen, (2002). Project Scheduling: A
- Engwall, M., & Jerbrant, A., (2003). The resource allocation syndrome: the prime challenge of multiproject management. *International Journal of project management*, 21(6), 403-409.
- Eppinger S.D., Whitney D.E., Smith R.P. & Gebala D.A., (1994)."A model-based method for organizing tasks in product development", *Res. Engineering Design*, 6(1), pp. 1-13,
- Fendley, L.G., (1968). Towards the development of a complete multiproject scheduling system. *Journal of Industrial Engineering* 19 (10), 505–515.

- Fink A, Homberger J (2013). An ant-based coordination mechanism for resource-constrained project scheduling with multiple agents and cash flow objectives. *Flex Serv Manuf J* 25:94–121
- Flyvbjerg, B., Bruzelius, N., and Rothengatter, W. (2003). *Megaprojects and Risk: An Anatomy of Ambition*. Cambridge University Press.
- Gantt, H. L. (1919). *Work, Wages, and Profits*. 2nd ed., revised and enlarged. New York: The Engineering Magazine Co.
- Gehringer, A. C. (1958). "Line of Balance". *Armed Forces Comptrol.*, vol. 12, no. 3, pp. 16 - 21.
- Geraldi, Joana G., (2008), The balance between order and chaos in multi-project firms: A conceptual model
- Giraldo, G., Aristizábal, D., Castellanos, J., Ordóñez, C., (2017) Identificación y análisis de métodos heurísticos basados en reglas de prioridad para la solución de problemas de programación de múltiples proyectos con recursos restringidos (RCMPSP).
- Goldratt E.M., (1997). "Critical Chain", North River Press, Great Barrington
- Gonçalves, J.F., Mendes, J.J.d.M., Resende, M.G.C., (2008). A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 189 (3), 1171–1190.
- Hanna, A. S., Taylor, C. S., & Sullivan, K. T. (2005). Impact of extended overtime on construction labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(6), 734-739. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:6(734)
- Hartmann, S., Kolisch, R., (2000). Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project-scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 127 (2), 394–407.
- Hartmann, S., & Briskorn, D., (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project-scheduling problem. *European Journal of operational research*, 207(1), 1-14.
- Hernández Sampieri Roberto, Fernández, C., Baptista, P., (2014). Metodología de la investigación. 6ª. Edición. McGraw hill. 37, 123.
- Herroelen, W.S., (2005). Project scheduling—theory and practice. *Production and Operations Management* 14(4), 413–432.

- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- Homberger, J., (2007). A multi-agent system for the decentralized resource-constrained multi-project scheduling problem. *International Transactions in Operational Research* 14 (6), 565–589.
- Homberger, J., (2009). A multi-agent system for the decentralized resource-constrained multi-project scheduling problem. *Int. Trans. In Oper. Res.* 14,565-589.
- J. E. J. Kelley and M. R. Walker, “Critical-path planning and scheduling,.” (1959) in *Papers presented at eastern joint IREAIEEACM computer conference on IREAIEEACM 59 Eastern*, pp. 160–173.
- J. H. Patterson, (1973). “Alternate methods of project scheduling with limited resources,” *Nav. Res. Logist. Q.*, vol. 20, no. 4, pp. 767–784
- J. Nievergelt, (2000) “Exhaustive Search , Combinatorial Optimization and Enumeration : Exploring the Potential of Raww Computing Power,” *Proceedings of the 27th Conference on Current Trends in Theory and Practice of Informatics*, pp. 18–35
- J. W. Fondahl, A non-computer approach to the critical path method for construction industry. (1961). *Dept. of Civil Engineering, Stanford University*
- Ju, C., & Chen, T., (2012). Simplifying multiproject scheduling problem based on design structure matrix and its solution by an improved aiNet al.gorithm. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/713740>
- Kanagasabapathi,B., Rajendran, R., and Ananthanarayanan K.,, (2009). Performance analysis of scheduling rules in resource-constrained multiple projects. *Int. J. Industrial and Systems Engineering, Vol. 4, No. 5*, pp. 502-535
- Karaa, F. A.; Nasr, A. Y. (1986). Resource management in construction. *Journal of Construction Engineering and Management* 112(3): 346–357
- Katsavounis, S. (2008). Scheduling multiple concurrent projects using shared resources with allocation costs and technical constraints. *Proceedings of the Third IEEE International C Information and Communication Technologies from Theory to Applications*, 1-6
- Keele, Staffs. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. In *Technical report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE. sn.*

- Kim, K.W., Y.S. Yun, J.M. Yoon, M. Gen, G. Yamazaki. (2005). Hybrid Genetic Algorithm with Adaptive Abilities for Resource-constrained Multiple Project Scheduling. *Computers in Industry*, 56(2) 143-160.
- Kitchenham, B., Brereton, O. P., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review. *Information and software technology*, 51(1), 7-15.
- Kolisch, R., Sprecher, A., and Drexel, A. (1995). Characterization and generation of a general class of resource constrained project scheduling problems. *Management Science*, 41(10):1693-1703.
- Kolisch, R., & Sprecher, A., (1996). PSPLIB - A project scheduling problem library: OR software-ORSEP operations research software exchange program. *European journal of operational research*, 96(1), 205-216.
- Kolisch, R., Schwindt, C., and Sprecher, A., (1998). Benchmark instances for scheduling problems. In: Weglarz, J. (Ed.), *Handbook on Recent Advances in Project Scheduling*. Kluwer, Amsterdam, pp. 197- 212.
- Kolisch, R. and Padman R., (2001). An integrated survey of deterministic project scheduling., *The International Journal of Management Science*. Omega, 29:249 - 272, 2001
- Kolisch, R., & Hartmann, S., (1999). Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. *Handbook on recent advances in project scheduling*.
- Kumanan, S., Jose, G.J., Raja, K., (2006). Multi-project scheduling using an heuristic and a genetic algorithm. *International Journal of Manufacturing Technology* 31 (3-4), 360 -366.
- Krüger, D., & Scholl, A., (2009). A heuristic solution framework for the resource constrained (multi-) project scheduling problem with sequence-dependent transfer times. *European Journal of Operational Research*, 197(2), 492-508.
- Kurtulus, I., Davis, E.W., (1982). Multi-project scheduling: categorization of heuristic rules performance. *Management Science* 28 (2), 161–172.
- Kurtulus, I.S., Narula, S.C., (1985). Multi-project scheduling: Analysis of project performance. *IIE Transactions*, 17, 58-66.
- Kurtulus, I., (1985). Multiproject scheduling: analysis of scheduling strategies under unequal delay penalties. *Journal of Operations Management* 5 (3), 291–307.

- Kyriakidis, Thomas S. (2012), Algorithms for Optimal Project Scheduling. *Department of Engineering Informatics and Telecommunications, University of Western Macedonia*.
- Leach L.P., (1999)."Critical chain project management improve project performance", *Project Management Journal*, 30(2), pp. 39-51,
- Lenstra, J. K., & Rinnooy Kan, A. H. G., (1978). Complexity of scheduling under precedence constraints. *Operations Research*, 26(1), 22-35.
- Liberatore, M.J., Pollack-Johnson, B., (2003). Factors influencing the usage and selection of project management software. *IEEE Transactions on Engineering Management* 50 (2), 164–174.
- Lova, A. & Tormos, P., (2001). Analysis of scheduling schemes and heuristic rules performance in resource-constrained multi-project scheduling. *Annals of Operations Research* 102 (1–4), 263–286.
- M. Algan, B. Roy, and M. Simonard, (1962). "Principes d'une méthode d'exploration de certains domaines et application à l'ordonnancement de la construction de grands ensembles," *Cah. du Cent. Mathématiques Stat. Appliquées aux Sci. Soc.*, no. 3, p. 41
- Mahmoodi, F., Mosier, C. T. and Guerin, R. E. (1996). The effect of combining simple priority heuristic in flow dominant shops. *International Journal of Production Research*, 34(3), 819-839.
- Maroto, C., Tormos, P., Lova, A., (1999). The evolution of software quality in project scheduling. In: *Weglarz, J. (Ed.), Project Scheduling. Kluwer Academic Publishers, Boston*, pp. 239–259.
- Mohanthy, R.P., Siddiq, M.K., (1989). Multiple projects multiple resources-constrained scheduling: some studies. *International Journal of Production Research* 27 (2), 261–280
- Montgomery, D., and Runger, G., (1996). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. *McGraw Hill*
- Morillo, D., Moreno, L., y Díaz, J., (2014). Metodologías Analíticas y Heurísticas para la Solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP): una revisión Parte 2. *Ingeniería y Ciencia*, 10(20), 203.
- Niazi, M., Mahmood, S., Alshayeb, M., Qureshi, A. M., Faisal, K., & Cerpa, N. (2016). Toward successful project management in global software development. *International Journal of Project Management*, 34(8), 1553-1567.

- Özdamar, L., Ulusoy, G., (1995). A survey on the resource-constrained project-scheduling problem. *IIE Transactions* 27(5), 574–586.
- Pascoe, T.L., (1966). Allocation of resources—CPM. *Revue Française de Recherche Opérationnelle* 38,31–38.
- Payne, J.H., (1995). Management of multiple simultaneous projects: a state-of-the-art review. *International Journal of Project Management* 13 (3), 163 - 168.
- Pérez, E., Posada, M., and Lorenzana, A., (2015). Taking advantage of solving the resource constrained multi-project scheduling problems using multi-modal genetic algorithms. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Pinto & Prescott, (1990). Planning and tactical factors in the project implementation process. *Journal of Management Studies* 27:3.
- Pritsker, A., Allan, B., Watters, L.J., Wolfe, P.M., (1969). Multiproject scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. *Management Science* 16, 93–108.
- Project Management Institute., (2013). Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK®) - Quinta edición.
- Quintero, Carlos., (2017). *Applications of Simheuristics and Horizontal Cooperation Concepts in Rich Vehicle Routing Problems*. Universitat Oberta de Catalunya. Department of Computer Science, Multimedia and Telecommunications.
- R. Bellman, (1957). “Dynamic Programming” *Ph.D. dissertation, Princeton University Press, Princeton, N. J.*,. 258
- Schwindt, C. (1995). ProGen/max: A new problem generator for different resource constrained project scheduling problems with minimal and maximal time lags. *Report WIOR 449. Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität at Karlsruhe*.
- Semwal VB, Raj M, Nandi GC (2015) Biometric gait identification based on a multilayer perceptron. *Robot Auton Syst* 65:65–75.
- Semwal VB, Singha J, Sharma PK et al. (2016). An optimized feature selection technique based on incremental feature analysis for biometric gait data classification. *Multimed Tools Appl*.

- Semwal VB, Mondal K, Nandi GC (2017). Robust and accurate feature selection for humanoid push recovery and classification: deep learning approach. *Neural Comput Appl* 28:565–574.
- Singh, A., (2014). Resource Constrained Multi-project Scheduling with Priority Rules & Analytic Hierarchy Process. *Procedia Engineering* 69, pp. 725-734
- Smith R.P. & Eppinger S.D., (1997) A predictive model of sequential iteration in engineering design, (1997). *Management Science*, 43(8), pp. 1104-1120,
- Speranza M.G. & Vercellis C., (1993). "Hierarchical models for multi-project planning and scheduling", *European Journal of Operational Research*
- Tavares LV. (1999). A review of major paradigms and models for the design of civil engineering systems. *European Journal of Operational Research*. 119, 1 - 13.
- Thesen, A. (1976). Heuristic scheduling of activities under resource and precedence restrictions. *Management Science* 23, 4, 412 - 422.
- Thesen, A. (1997). Measures of the restrictiveness of project networks. *Networks*, 7:193 – 208.
- Tsai, DM, Chiu, HN (1996). Two Heuristics for scheduling multiple projects with resource constraints. *ConstrManage Econ* 14, 325 – 340
- Tseng, C. C., (2008). Two heuristic algorithms for a multi-mode resource- constrained multi-project scheduling problem. *Journal of science and Engineering Technology*, 4(2), 63-74
- Ulusoy, G., Özdamar, L., (1989). Heuristic performance and network/resource characteristics in resource-constrained project scheduling. *Journal of the Operational Research Society* 40(12), 1145–1152.
- U. S. W. A. D. Division, Directorate of Systems Management: PEP: Program Evaluation Procedure. 1960.
- Vercellis, C., (1994). Constrained multi-project planning problems: a Lagrangean decomposition approach. *European Journal of Operational Research* 78, 267 - 275.
- Viana A., Pinho de Sousa J., (2000). Using metaheuristics in multiobjective resource constrained project Scheduling. *European Journal of Operational Research* 120: 359-374

- Villafañez, F., Pajares, J., & López, A., (2010). Un modelo de programación de entornos multi-proyecto basado en la Metodología de la Cadena Crítica. *In 4th International Conference On Industrial Engineering and Industrial Management* (pp. 1526-1535).
- Villafañez, F., Pajares, J., López, A., and De la Fuente, D., (2014). From the RCPSP to the DRCPSP: Methodological Foundations.
- Villafañez, F., Pajares, J., López, A., and Olmo., (2018). A generic heuristic for multi-project scheduling problems with global and local resource constraints (RCMPSP).
- Wauters, T., Verbeeck, K., Verstraete, P., and De Causmaecker, P., (2012). Real-world production scheduling for the food industry: An integrated approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 2, pp. 222–228.
- Wauters M, Vanhoucke M (2017) A nearest neighbour extension to project duration forecasting with artificial intelligence. *Eur J Oper Res* 259:1097 - 1111.
- Woodworth, B. M. and Willie, C. J., (1975), A heuristic algorithm for resource leveling in multi-project, multi-resource scheduling. *Decision Sciences*, 6: 525–540. doi:10.1111/j.1540-5915.1975.tb01041
- Xiang, W., Shou, Y., Li, Y., and Yao W., (2014). A Multiagent Evolutionary Algorithm for the Resource-Constrained Project Portfolio Selection and Scheduling Problem. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, 9 pages.
- Yang, R., Li, W., Jiang, P., Zhou, Y., and Wu, G. (2014). A modified differential evolution algorithm for resource constrained multi-project scheduling problem. *Journal of Computers*, 9(8), 1923.
- Z. Michalewicz and D. B. Fogel, (2000). How to Solve It: Modern Heuristics. *Springer*
- Zuloaga, M., (2017). Optimizing resource allocation in a portfolio of projects related to technology infusion using heuristic and meta-heuristic methods. *Massachusetts Intitute Of Tecnology*.

ANEXOS

Anexo A - Combinaciones posibles tanto de 2 como de 3 reglas de prioridad.

Anexo B - Tabulación y análisis estadístico descriptivo para las combinaciones dobles y triples..

Anexo C - Consolidación de los resultados obtenidos para las medidas de desempeño de las reglas de prioridad y sus combinaciones dobles y triples

Anexo D - *Ranking* Global

Anexo E - Resultados de repeticiones para las 7 mejores combinaciones

Anexo F - Instancia de alta complejidad

Anexo G - Caracterización como instancia del multi-proyecto "Portal del Parque"